



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Maaehituse ja veemajanduse õppetool

**Klaid Melnikov**

**KLAASJÄÄTMETE KASUTAMINE BETOONI  
JÄMETÄITEMATERJALINA NING SELLE MÕJU  
BETOONI SURVETUGEVUSELE**

**USING RECYCLED CRUSHED GLASS AS COARSE  
AGGREGATE FOR CONCRETE AND ITS INFLUENCE ON  
COMPRESSION STRENGTH**

Magistritöö

Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Vello Pallav

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Klaid Melnikov		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Klaasjäätmete kasutamine betooni jämetäitematerjalina ning selle mõju betooni survetugevusele			
Lehekülgi: 78	Jooniseid: 17	Tabeleid: 14	Lisasid: 3
Osakond:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
Uurimisvaldkond:		Loodusteadused ja tehnika, T220	
Juhendaja:		Vello Pallav	
Kaitsmiskoht ja- aasta:		Tartu 2019	
<p>Käesolevas magistritöös uuriti purustatud jäätmeklaasi kasutamist betoonis ning selle mõju betooni survetugevusele. Betooni valmistamiseks vajalike looduslike täitematerjalide varud vähenevad kiiresti ning vaja on leida neile sobivaid alternatiive. Kuna maailmas on suur jäätmeprobleem, siis üheks võimalikuks betooni täitematerjali asendajaks võiks olla jäätmete hulgast sorteeritud klaas.</p> <p>Töö eesmärk oli jämetäitematerjali osaline asendamine purustatud jäätmeklaasiga betoonis ning sellisel viisil valmistatud katsekehade survetugevuse hindamine. Töö käigus anti ülevaade betooni ja klaasi ajaloost Eestis ja maailmas, klaasjäätmete hulkadest Eestis aastatel 2004-2017 ning tutvustati varasemaid uurimusi ja katseid antud teema osas. Lisaks kirjeldati lähemalt räni-leelise reaktsiooni olemust ja selle uurimise ajalugu ning koostati tasuvusanalüüs jäätmeklaasi kasutamise kohta betoonisegus.</p> <p>Survetugevuse hindamiseks valmistati kolm erinevat betoonisegu, kus karastatud jäätmeklaasiga asendati jämetäitematerjali 40% ja 60% ulatuses jämetäitematerjali massist ning segu, kuhu lisati 20% jäätmeklaasi. Katsekehasid valmistati 56 ning nende survetugevust hinnati purustaval meetodil.</p> <p>Katsetulemused näitasid, et mitte ükski valmistatud betoonisegudest ei saavutanud peale 28 päevast kivistumist kandekonstruksioonides kasutamiseks vajaminevat keskmist survetugevust. Kõige kõrgem keskmine survetugevus, 32,57 MPa oli betoonisegul, kus</p>			

jäätmeklaasiga asendati 40% jämetäitematerjali massist. Kõige väiksem keskmine survetugevus, 23,46 MPa oli betoonisegul, kuhu lisati 20% jäätmeklaasi. Sama betoonisegu kivistumisel 90 päeva tõusis aga betooni survetugevus 31,77 MPa-ni.

Läbi viidud tasuvusanalüüs näitas, et jäätmeklaasi kasutamine betooni valmistamisel langeb toote omahind märkimisväärselt ning võib anda tootjale olulise eelise.

Töös selgus, et karastatud jäätmeklaas on sobivaks jämetäitematerjali asendajaks betoonis. Optimaalseks asendamise koguseks hinnati 40% jämetäitematerjali massist.

Täiendavalt oleks vajalik räni-leelise reaktsiooni võimalikkuse hindamine ning jäätmeklaasiga valmistatud betooni külmakindluse uurimine.

Märksõnad: Betoon, täitematerjalid, klaas, taaskasutamine, survetugevus

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Klaid Melnikov		Specialty: Rural engineering	
Title: Using recycled crushed glass as coarse aggregate for concrete and its influence on compression strength			
Pages: 78	Figures: 17	Tables: 14	Appendixes: 3
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and CERCS code:		Natural Sciences and Engineering, T220	
Supervisor:		Vello Pallav	
Place and date:		Tartu, 2019	
<p>In the Master's thesis, the use of crushed waste glass as coarse aggregate in concrete and its influence on compression strength was investigated. Stocks of natural aggregates needed for the production of concrete are rapidly diminishing and suitable alternatives are needed. Since there is a major waste problem in the world, one of the possible substitutes for concrete aggregates could be sorted waste glass. The purpose of the work was to use crushed glass as partial replacement for coarse aggregates in concrete and to evaluate the compressive strength of test specimens. The work gave an overview of the history of concrete and glass in Estonia and in the world, the quantities of glass waste in Estonia between 2004-2017 and earlier studies and experiments on this topic were introduced. In addition, the nature of the alkali-silica reaction and the history of its investigation were described and a cost-benefit analysis was prepared on the use of the waste glass in the concrete mixture.</p> <p>In order to assess the compressive strength, three different concrete mixes were prepared. In these mixes, the natural coarse aggregates were replaced by tempered waste glass by 40% and 60% of the coarse aggregate weight and one mix was also made where 20% of the waste glass was added. Total of 56 specimens were prepared and their compressive strength was evaluated with compression test.</p> <p>The test results showed that after curing the specimens for 28 days, none of the prepared concrete mixes achieved the average compression strength needed for building bearing structures. The highest average compression strength, 32.57 MPa, was achieved by concrete mix where 40% of the natural coarse aggregates was replaced by the tempered</p>			

waste glass. The lowest average compression strength, 23.46 MPa, was achieved by concrete mixture in which 20% of the waste glass was added. However, when the same concrete mixture was cured for 90 days, the compressive strength of the concrete increased to 31.77 MPa.

The cost-benefit analysis showed, that waste glass in concrete significantly lowers the cost of concrete product and can give the manufacturer an advantage.

The thesis showed that tempered waste glass is a suitable substitute for natural coarse aggregate in concrete. The optimum amount of substitution was estimated at 40% of the natural coarse aggregate.

Additionally an alkali-silica reaction is necessary to investigate further and an investigation of the frost resistance is also needed.

**Keywords:** Concrete, aggregates, glass, recycling, compression strength

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	8
1. ÜLEVAADE BETOONIST JA BETOONI AJALOOST .....	11
1.1 Betooni ajalugu maailmas .....	11
1.2 Betooni ajalugu Eestis .....	14
1.3 Betoonehitus maailmas tänapäeval .....	15
2. ÜLEVAADE KLAASIST, KLAASI AJALOOST NING KLAASJÄÄTMETEST EESTIS JA MAAILMAS .....	17
2.1 Klaasi ajalugu maailmas .....	17
2.2 Klaasi ajalugu Eestis .....	19
2.3 Klaasjäätmed Eestis .....	22
2.3.1 Klaasjäätmete kogused Eestis aastatel 2004-2017 .....	23
2.3.2 Klaasjäätmete import ja eksport .....	25
2.3.3 Klaasjäätmete käitlemine .....	26
2.4 Klaasjäätmed maailmas .....	29
3. KLAASJÄÄTMETE KASUTAMINE BETOONIS NING BETOONI SURVETUGEVUST MÕJUTAVAD TEGURID .....	32
3.1 Klaasjäätmete kasutamine betoonis .....	32
3.1.1 Räni-leelise reaktsioon .....	32
3.1.2 Klaasjäätmete kasutamine tsemendi osalise asendajana .....	36
3.1.3 Klaasjäätmete kasutamine täitematerjalide osalise asendajana .....	37
3.2 Betooni koostisosad, mis mõjutavad betooni survetugevust .....	41
3.2.2 Liiv .....	42
3.2.3 Jämetäitematerjal .....	43
3.2.4 Vesi .....	44
3.3 Katses kasutatud materjalid ja nende kirjeldus .....	44
4. KATSED .....	49
4.1 Katsete meetodika .....	49
4.2 Betoonisegude valmistamine survetugevuse katse jaoks .....	52
4.3 Survekatse meetodika .....	53

4.4	Katsetulemuste analüüs.....	55
4.4.1	Survetugevus .....	55
4.4.2	Tasuvusanalüüs.....	61
KOKKUVÕTE .....		64
KASUTATUD KIRJANDUS .....		66
LISAD .....		71
Lisa 1. Materjalide sertifikaadid ning vastavusdeklaratsioonid.....		72
Lisa 2. Erinevate koostisega betoonisegude survetugevuse katsetamise tulemused .....		75
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta .....		78

## SISSEJUHATUS

Ehitamine on olnud oluliseks tegevuseks inimkonna ajaloos. Uute materjalide ja lahenduste leiutamine ja kasutusele võtmine on seejuures olnud valdkonna arengus väga tähtsal kohal. 21. sajandiks on tänu kasvavale populatsioonile ja jätkuvale linnastumisele suurenenud ka ehitusmahud. Aina päevakajalisemaks on muutunud seejuures ka erinevad keskkonnaprobleemid ning rohkem pööratakse tähelepanu meid ümbritseva hoidmisele ja säilitamisele. Ajapikku on jõutud ka arusaamisele, et mida rohkem on planeedil inimesi, seda suurem on ka prügi ja jäätmete teke. Prügi tuleb aga kuskile paigutada. Kuna varasemalt ei pööratud nii suurt tähelepanu sellele, kuhu ja mis jäätmeid ladestatakse, siis nüüdseks on see endaga kaasa toonud mitmeid tõsisid keskkonnaprobleeme. Edasiste kahjude vähendamiseks ja vältimiseks on loodud erinevaid süsteeme, mis võimaldavad ümber töödelda või taaskasutada järjest rohkem jäätmeid. Mõeldes loodusele ja meid ümbritsevale on hakatud keskkonnasõbralikkusele rohkem keskenduma ka ehitusmaterjalide ja ehitustegevuse osas. Kuna ehitussektor on tänapäeval ühe suurima ökoloogilise jalajäljega tööstusharu, panustatakse uute jätkusuutlike tehnoloogiate arendamisesse selles suuremal määral. Kasutusele võetakse uusi keskkonnasõbralikke ehitusmaterjale ning täiustatakse varem tuntuid. Muutmaks ehitustegevust keskkonnasõbralikumaks on paljud riigid vastu võtnud neid protsesse reguleerivaid seadusi ja määrusi. Betoon on olnud juba sajandeid üheks levinuimaks ehitusmaterjaliks. Betoon on tehismaterjal, mille valmistamiseks kasutatakse looduslikke täitematerjale, tsementi ning vett. Saadud segu on võimalik vormida vastavalt soovile ja vajadusele. Betoonkonstruktsioonide arengulugu on olnud pikk ja viimasel ajal ka kiire. Kasutusele on võetud erinevad botooni omadusi mõjutavad lisandeid ja eri tüüpi sarruseid, nagu teraskiud, plastkiud. Kasutatakse detailide eel- ja järelpingestamist, õõntega plokkide ja paneele. Kuna nii liiv kui ka killustik on taastumatud looduslikud materjalid, siis on viimane aeg hakata mõtlema nende asendamisele betoonis seni jäätmete hulka arvatud materjalidega: klaas, kõva plastik, purustatud betoonjäätmekivid jne. Üheks selleks võimaluseks on kasutada klaasi. Klaas on sarnaselt betoonile olnud populaarne ehitusmaterjal juba sajandeid. Maailmas igapäevaselt tekkivatest jäätmehulkadest arvestatava osa moodustab klaas. Klaasi on võimalik lihtsalt töödelda ning



see annab lootust, et tegemist on ühe võimaliku alternatiivse materjaliga betooni valmistamiseks.

Käesoleva magistritöö eesmärk on purustatud jäätmeklaasi kasutamine betooni jämetäitematerjali osalise asendajana ning sellisel moel valmistatud betooni survetugevuse hindamine. Lähtudes OÜ Kotton Betoon tootearenduse soovist ja ettevõtte eesmärkidest hinnatakse magistritöös jäätmeklaasi kasutamise võimalikkust ja otstarbekkust. Uuritakse, millises mahu on optimaalne looduslikku jämetäitematerjali jäätmeklaasiga asendada. Betoonisegu valmistamiseks kasutatakse karastatud klaasi. Kuna karastatud klaas on ligi viis korda tugevam, kui tavaline olmeklaas, siis selgitatakse töös, kas see annab eelise ka parema survetugevuse saavutamiseks betoonis. Selleks võrreldakse saadud katsetulemusi varasemate teadustööde ja kirjanduslike allikatega. Lähtuvalt magistritöö eesmärkidest püstitati hüpotees, et jämetäitematerjali osaline asendamine jäätmeklaasiga tagab betoonile survetugevusklassi C30/37, mis võimaldab seda kasutada kandekonstruktsioonides.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade betooni ajaloost. Seejuures räägitakse betooni kui ehitusmaterjali tekkimisest, selle valmistamisest ning betooni ja selle komponentidega seotud edasiminekutest maailmas. Samuti vaadeldakse betooni valmistamise ja betoonehituse ajalugu Eestis. Lisaks antakse peatüki lõpus ülevaade ka tänapäevasest betoonehitusest maailmas erinevate näidete baasil.

Teises peatükis tutvustatakse klaasi valmistamise ja tootmise ajalugu maailmas ning Eestis. Vaadeldakse edasiminekuid klaasi valmistamise tehnoloogias alates esimestest teadaolevatest klaasi valmistajatest. Samuti antakse jäätmearuandluse infosüsteemist saadud andmete põhjal ülevaade erinevatest klaasjäätmetest Eestis aastatel 2004 – 2017. Vaadeldakse klaasjäätmete tekkehulkasid liigiti ning kogutud jäätmetega läbi viidud toiminguid.

Kolmandas peatükis antakse ülevaade varem läbiviidud uuringutest, kus jäätmeklaasi on kasutatud nii tsemendi kui ka täitematerjalide asendajana. Lisaks kirjeldatakse betooni erinevate koostisosade mõju betooni survetugevusele. Koostisosadena käsitleti tsementi, liiva, jämetäitematerjali ja vett. Kuna jäätmeklaasi kasutamine betoonis võib esile kutsuda räni-leelise reaktsiooni on töös tutvustatud selle olemust ja sellel teemal läbi viidud varasemaid uuringuid.

Neljandas peatükis on esitatud läbiviidavate katsete metoodika, kirjeldatud katsekehade valmistamist ning survetugevuskatseid. Peatüki lõpus on esitatud katsetulemused ning arutelu katsetulemuste osas. Lisatud on ka tasuvusanalüüs jäätmeklaasi kasutamise kohta betooni valmistamisel.

Autor tänab juhendajat Vello Pallavit professionaalse juhendamise ja meeldiva koostöö eest. Lisaks tänab autor OÜ Kotton Betooni, mille juhtkond andis tasuta katsematerjalid ja aitas kaasa katsekehade valmistamisel.

# **1. ÜLEVAADE BETOONIST JA BETOONI AJALOOST**

## **1.1 Betooni ajalugu maailmas**

Betoon on tänapäeval üks laiemalt kasutatavaid ehitusmaterjale ning on olnud tähtsaks ehitusmaterjaliks sajandeid. Betoon on materjal, mille saamiseks segatakse omavahel kokku tsement, jäme- ja peentäitematerjal ning vesi [1]. Betooni või betooni laadse segu valmistamise lihtsus on võimaldanud materjali kasutada juba kaugel minevikus. Betooni kasutuselevõtu konkreetset algusaega ei ole suudetud tänaseni üheselt määrata. Levivad erinevad arvamused betooni leiutamise algusajast ja kohast. On teada, et esimesed betooni laadest segust valmistatud konstruktsioonid (ka vettpidavad) pärinevad Süüria ja Jordaania territooriumilt ning nende valmistamise ajaks pakutakse 6500 aastat eKr [2,3]. Betooni valmistamise tehnoloogiat arendati aastate jooksul edasi ning ajapikku mõisteti, et betooni valmistamiseks kasutatav põletatud lubi peaks olema võimalikult kuiv ning seeläbi moderniseeriti põletusahjude tehnoloogiat ning ehitati ka tsisterne materjali paremaks ladustamiseks [4].

Vanas Egiptuses (2500 – 3000 a eKr) kasutati samuti betoonilaadset segu. Erinevalt tänapäeva betoonivalmistamise tehnoloogiast kasutati nii Egiptuses kui Nabateas jahvatatud savi asemel lupja. Lisaks kombineeriti erinevate materjalidega – kips, savipinnas, heinakõrred. Oletatavasti valmistati 500 000 tonni sellist segu ka Giza püramiidide ehitamiseks. [2,3]

Samal ajaperioodil, ligikaudu 3000 aastat eKr, leiutati Hiinas analoogne betoonilaadne segu nagu Vana-Egiptuses. Erinevus seisnes selles, et Hiinas kasutati heinakõrte asemel täiteaineks bambust ning sama materjali kasutati hilisemalt ka Suure Hiina müüri ehitustöödel [3]. Tänapäevased spektromeetriga tehtud uuringud on näidanud, et lisaks

eelnevalt mainitud betoonisegule kasutati Suure Hiina müüri valmistamiseks ka betoonisegu, mille üheks tähtsaks komponendiks oli hoopis riis [5]. Sellisel viisil valmistatud konstruktsioone on Hiinas lisaks maailma pikimale müürile veel teisigi ning nende vastupidavus on olnud märkimisväärne.

Esimene betoonisegu, mis sarnaneb rohkem meie tänapäevase betooniga, valmistati Vana-Roomas (753 eKr – 476 pKr). Roomlased olid osavad ehitusmeistrid ja antiikaja kõige märkimisväärsamad ehitised Euroopas on ehitatud nende poolt: Rooma Pantheon, Colosseum, Rooma linna akvedukt Via Appia, Caracalla termid ja mitmed teiedi rajatised ning ka monumendid. Nende insenertehniliste lahenduste geniaalsus ning mitmete hoonete säilimine tänaseni näitab, et roomlaste teadmised ja oskused ehitusvaldkonnas olid kõrgel tasemel. Pantheoni eripäraks on veel ka see, et tegemist on kuni tänase päevani maailma suurima betoonist valatud kupliga, kus ei ole kasutatud tugevdamiseks terast või muid materjale. Vana-Roomas kasutatava betooni tegi kvaliteetseks ning eriliseks Itaalia piirkonnale omapärane vulkaaniline tuhk. Esialgu kaevandati vulkaanilist tuhka mitmetest erinevatest vulkaanilistest piirkondadest, siis alates Rooma esimese keisri Augustuse valitsemisajast hakati kasutama põhiliselt ühte vulkaanilise tuha allikat. Selleks oli 20 kilomeetri kaugusel Roomast asuvate Albani mägede tuhamaardla, mida kutsuti *Pozzolane Rosse*-ks. Seda konkreetset maardlat eelistati, sest selle materjaliga valmistatud betoon paistis silma oma vastupidavusega. Lisaks *Pozzolane Rosse* tuhamaardlale oli roomlastel veel teine eelistatud tuha hankimise koht. Selleks oli Napoli lahe ääres asuv tuhamaardla. Napoli lahe ääres kaevandatud tuha tegi eriliseks see, et sellega valmistatud betoonkonstruktsioonid olid äärmiselt vastupidavad Vahemere piirkonna soolases merevees. Sellest tulenevalt oli tegemist ka väga väärtusliku materjaliga mitte ainult Itaalias vaid ka teistes Vahemere äärsetes riikides, kus rajati sadamaid. Kuni tänase päevani ei ole suudetud täielikult selgeks teha, mis muutis selle betoonisegu vastupidavaks merevees olevate kloriidide ja sulfaatide vastu, kuid oletatavalt moodustusid betooni sisse mikroskoopilised struktuurid, mis betooni imbuva merevee abil muutsid betooni struktuuri hoopis tugevamaks. Betoonisegu valmistamiseks kasutasid roomlased lisaks vulkaanilisele tuhale ka põletatud lupja ning täitematerjalidena kasutati mitmeid erinevaid materjale, alustades graniidist lõpetades vulkaaniliste kivikestega. Lisaks hakkasid roomlased lisama oma betoonisegule loomseid saaduseid, näiteks piima, verd ja rasva, erinevate eesmärkide saavutamiseks. Rooma keisririigi kadumisega 476. aastal lõppes ka kvaliteetse ja tugeva betooni valmistamine ligi tuhandeks järgneva aastaks. 1414. aastal avastati vanad

käsitarkad, milles kirjeldatakse putsolaantsemendi valmistamist ja mis äratasid taas huvi betooni kasutamise vastu. Reaalsed arengud betooni valmistamise valdkonnas toimusid aga 1793. aastal, kui John Smeaton avastas hüdraulilise lubja, mille omaduste hulka kuulus ka võime kivistuda vee all, võimaldades seeläbi veekindla betooni valmistamist. [5,6]

Aastal 1824 leiutas inglane Joseph Aspdin meile tänapäevasele tuttava portlandtsemendi, põletades ahjus 700-815 kraadi juures lubjakivi ja savi segu ning saadud materjali hilisemalt jahvatades. Tsemendi nimetus tulenes Inglismaal asuvast Portlandi karjäärast leitavatest äärmiselt kõrge kvaliteediga kividest. Aastatel 1835 – 1850 viidi läbi esimesed korrapärased katsed kivistunud tsemendi surve- ja tõmbetugevuse määramiseks ning samal perioodil viidi läbi ka esimesed täpsed tsemendi keemilised analüüsid. Kuigi portlandtsement leiutati juba 1824. aastal, sai tsement meile tänapäeval tuntud koostise alles 1860. aastatel. [5]

Juba varasemalt eksisteeris teooria, et betooni on võimalik koos terasega kasutada, kusjuures survepingeid võtab vastu betoon ning tõmbepingeid teras. Selline kasutusviis on võimalik, sest materjalide soojuspaisumise tegurid on peaaegu võrdsed. Esimese raudbetoonkonstruktsiooni leiutajaks peetakse Joseph Monier'i, kes kasutas betoonist lillepottide ja aiapostide valmistamiseks terassarrust. Aastal 1867 patenteeris ta ka oma leiutise. 19. sajandi lõpuks oli leiutatud ka eelpingestatud raudbetoon ning hakati tegelema ka betoonkonstruktsioonide projekteerimise ja valmistamise teoreetilise alusega. [7]

20. sajandi esimesel poolel ei toimunud betoonehituse arengus märkimisväärsed uuendusi ning edasiminekuid. Sajandi algusaastatel kerkima hakanud kõrghooned ehitati suuremas osas teraskonstruktsioonidest ning laiem huvi betooni kasutamise vastu oli leige. Raudbetoonkonstruktsioonidest valmistati tööstus- ning eluhooneid. Märkimisväärsetest ehitistest valmis 1913. aastal üheks maailma olulisemaks transpordisõlmeks peetav Panama kanal, mille valmistamiseks kulus üle miljoni kuupmeetri betooni [8]. Kõrghoonete osas tekkis taas huvi raudbetooni kasutamise vastu 1960. aastatel, kui Chicagosse rajati 60-korruselised Bertrand Goldbergeri kaksiktornid [4].

Kuigi 20. sajandi esimesel poolel ei ehitatud raudbetoonist ehk kõige suurejoonelisemaid hooneid, kasutati materjali järjest rohkem lihtsamate hoonete puhul ning sajandi jooksul muutus raudbetoon üheks enim kasutatavaks ehitusmaterjaliks maailmas. Sellel positsioonil püsib ta tänaseni.

## 1.2 Betooni ajalugu Eestis

Eesti betooni ajalugu sai alguse 1860. aastatel, kui tsemenditootmise vastu hakkas huvi tundma Kunda mõisa omanik John Girald de Soucanton. Ta proovis esimesena Eestis kohalikest materjalidest, merglist ja sinisavist, valmistada tsementi. 1870. aastast alates hakati Kundas tsementi tootma juba suuremates mahtudes. [9] Tsemendi tootmine läks Eestis käima edukalt ning kasvavad tootmismahud tekitasid juba 1895. aastaks vajaduse tsemenditehase kaasajastamise ja laiendamise järele. Tsemendi kogutoodang Eestis 20. sajandi alguseks küündis juba ligi 50 000 tonnini aastas ning sellest suurem osa toodeti just välisurgudele. Kunda tsemenditehase tõeline areng toimus aga Nõukogude Liidu ajaperioodil. 1960. aastate alguseks oli tootmismahud kasvanud 300 000 m<sup>3</sup>-ni aastas. Selle põhjustas üleliiduline laiahaardeline ehitustegevus ning vajadus erinevate betoonkonstruktsioonide järele. [10]

Eesti betoonehituse üheks silmapaistvamaks saavutuseks on 1917. a Tallinnas valminud lennusaama vesilennukite angaarid [10], mis on ainulaadse konstruktsiooniga. Angaaride põhiosaks on kolm kaksikkõverat raudbetoonkoorikut ning neid liitekohtadest ning nurkadest toetavad postid. Betoonkooriku paksus on vahemikus 80 – 120 mm ning selle näol on tegemist ka maailma esimese koorikbetoonist rajatisega. Samuti näitab hoone suurejoonelisust see, et olles 36,4 m lai ning 116 m pikk, oli tegemist esimese niivõrd suure sildega hoonega maailmas. Hoone projekteerijateks oli Taani firma Christiani & Nielsen. [11]

Hilisemal ajal Eestis valminud betoonehitistest võiks ära märkida kõige kõrgema ehitise - 314 m kõrge Tallinna teletorni, mis valmis 1980 aastal. Tallinna teletorn koosneb kokku kolmest osast: esimene osa on vundament, teine osa on 190 m kõrgune raudbetoonist tüvi ja kolmas osa on 124 m kõrgune terasest antenn. Lisaks on torni 150 m ja 182 m vahele jääv osa läbimõõduga 38 m. Hoone valmistamiseks kasutati mitmeid innovatiivseid ehituslahendusi, millest üks oli liugvormi kasutamine raudbetoontüve valmistamiseks.

Torni rajamiseks kasutatud betooni koostis töötati välja Tallinna Polütehnilises Instituudis professor Verner Kikase juhendamisel. Kasutatav betoon oli põlevkivituha ja portlandtsemendi alusel valmistatud segu. Tööde teostamiseks läks vaja kokku 17 500 tonni betooni ja 330 km armatuurterast. Valmides kaalus hoone ligikaudu 20 000 tonni. Teletorni vaateplatvormi 120 tonni kaaluv terassõrestik monteeriti ümber torni tüve maapinnal ning tõsteti seejärel oma kohale 170 m kõrgusele. Tallinna teletorn kestis ilma suuremate remontideta kuni 2010. aastani, kui algasid torni rekonstrueerimistööd. Kolmekümneaastase perioodi jooksul muutus teletorn Eesti üheks rahvuslikuks sümboliks. [12]

### **1.3 Betoonehitus maailmas tänapäeval**

Raudbetooni kasutuselevõtt on nihutatud ehitusvõimekuse piire ja võimaldanud inseneridel luua suurejoonelisi rajatisi ja ehitisi kogu maailmas.

Tänapäeval peetakse maailma suurimaks betoonrajatiseks Hiinas, Hubei provintsis asuvat Kolme Kuristiku hüdroelektrijaama paisu. Pais on ehitatud Jangtse jõe ja seda kasutatakse ka sillana. Rajatis on oma mõõtmetelt väga suur – pikkusga 2335 m ning kõige kõrgemas kohas 185 m kõrge. Rajatise mass on 64,94 miljardit tonni [13, 14]. Paisu ehitamiseks kasutati kokku 28 miljonit kuupmeetrit betooni ning armeerimiseks kasutati 463 000 tonni terasmaterjali [13]. Tegemist oli projektiga, mille elluviimise tõttu pidi ligikaudu 1,9 miljonit inimest elukohta vahetama [13].

Viimase paari sajandi jooksul elavnenud urbaniseerumine on sundinud insenere mõtlema sellele, kuidas mahutada kahanevasse linnaruumi võimalikult palju elu- ja büroopindu. Seetõttu ehitatakse järjest rohkem kõrghooneid. Kui esimesed kõrghooned ehitati suuremalt jaolt teraskonstruktsioone kasutades, siis praegu on kõrghoonete ehitamisel eelistatud pigem raudbetooni. Kõrghoonete ehitamise eestvedajaks on tänapäeval Araabia Ühendemiraadid. Hetkel maailma kõrgeima hoone tiitlit kandev Burj Khalifa on suurejooneline nii visuaalses mõttes kui ka tehnilise lahenduse poolest.

Pilvelõhkuja kõrgus on 828 m ning seal on rohkem kui 160 korrust [15]. Märkimisväärne on ka hoone ehitamiseks kasutatud materjalide hulk. Hoone ligi 50 m sügavusele ulatuva vaivundamendi rajamiseks kasutati üle 45 000 m<sup>3</sup> betooni ning hoone põhimahu ehitamiseks kulus 330 000 m<sup>3</sup> betooni [16]. Hoone kõrgeimate osade betoonkonstruktsioonid on valatud 80 MPa survetugevusega betoonist ning selle pumpamisel ligi 600 m kõrgusele ulatusid pumpade rõhud kuni 200 baarini. Ehitustegevus kestis 6 aastat ning seda juhtis üle 380 kogenud inseneri. [16]

Lisaks hoonete ehitamisele on olulisel kohal ka erinevate infrastruktuuri osade ehitamine. Sõltuvalt piirkonna geograafilistest ja geoloogilistest iseärasustest võivad taristuprojektid olla väga kulukad ja keerulised. Vajadus viia tee läbi mägede, üle veekogude või mõnel muul moel liikluse võimaldamine piirkonnas vajab tihtipeale väga keerukaid lahendusi. Euroopas on ehitatud linnadevahelise transpordi tarvis mitmeid olulisi rajatisi. Euroopa kõige pikemaks sillaks on suures osas betoonkonstruktsioonile rajatud vantsild, Portugalis, Lissabonis asuv Vasco da Gama sild, mis on 17 km pikkuse sillatekiga rajatud üle Tejo jõe [17]. Sildadest Euroopas võiks veel nimetada näiteks maailma üheks kõrgeimaks rajatis peetavat Millau viadukti Prantsusmaal ja Taanit mandri Euroopaga ühendavat Suur-Beldi silda [18-19]. Mõlema puhul on konstruktsioonis tähtsal kohal raudbetoon.

Ehitusmahu kasvamisega on suurenenud ka taastumatute loodusvarade kasutamine. Seetõttu pööratakse 21. sajandil järjest rohkem tähelepanu ka ehitiste sisekliimale, ehitise kui terviku mõistlikule toimimisele, ehitamise meetoditele ja kasutatavatele materjalidele. Muutes ehitustegevust keskkonnasõbralikumaks, vähenevad inimtegevuse mõjud kliimale ning erinevate taastumatute maavarade kulutamine.



## **2. ÜLEVAADE KLAASIST, KLAASI AJALOOST NING KLAASJÄÄTMETEST EESTIS JA MAAILMAS**

### **2.1 Klaasi ajalugu maailmas**

Klaasi on sarnaselt betoonile ehitusmaterjalina kasutatud juba väga pikka aega. Arvatatakse, et egiptlased kasutasid klaasi juba *ca* 3500 a eKr. Klaasi tegelikeks leiutajateks peetakse siiski Mesopotaamia Hurriani või Mitanniani regioonides elanud hõimusi, kes oskasid klaasi sarnast materjali toota juba ligi 5000 a eKr. Esimesed klaasnõud valmistati arvatavasti 1500 aastat eKr ning klaasi kasutamine järgneva 300 aasta jooksul laienes. Seejärel, sarnaselt betoonile, takerdus klaasi valmistamise ja kasutamise areng ning järgneva 500 aasta jooksul märkimisväärsed uuendusi selles vallas ei toimunud. Alles 700. – 500. aastatel eKr taaselustati klaasi tootmine Mesopotaamias, Egiptuses ja Süüria aladel ning järgneva 500 aasta kestel olid Vahemere idarannikul asuvad riigid põhilisteks klaasitootmise keskusteks. [20]

Klaasi tootmine ja kasutamine Euroopas hoogustus Vana-Roomas. Kui varasemad tsivilisatsioonid valmistasid klaasist põhiliselt tarbe- ja dekoratiivesemeid, siis roomlased alustasid klaasi masstootmisega. Klaasi valmistati tollal põhiliselt ränidioksiidi, naatriumvesinikkarbonaati ja lupja kasutades. Lupja kasutati stabilisaatorina ning naatriumvesinikkarbonaati kasutati selleks, et oleks võimalik ränidioksiidi sulatada madalamal temperatuuril. Naatriumvesinikkarbonaati hangiti kuivanud järvede põhjast. Põhiliseks impordiallikaks oli Egiptuses asuv Wadi El Natruni piirkond, kus asus kokku kaheksa leelisjärve, millest egiptlased kogusid naatriumvesinikkarbonaati mumifitseerimise tarbeks. [21-22]

Areng klaasi tootmistehnoloogias toimus 1. sajandil eKr, kui Süüria käsitöölised leiutasid puhumistoru. See lihtsustas klaasesemete tootmist ning tõstis töö efektiivsust.

Kuna varasemalt toodeti klaasi ahjudes, mis andsid vaevu välja vajaliku temperatuuri klaasi sulatamiseks, oli puhumistoru leiutamine suur edasiminekuks. [22]

Klaasipuhumise tehnoloogia kasutuselevõtt võimaldas valmistada oluliselt õhemat ja voolavamalt klaasi, mida oli võimalik kergemini töödelda. Roomlased võtsid uue tehnoloogia kasutusele ja hakkasid klaasi puhuma vormidesse, mis võimaldas saada erikujulisi tooteid. Klaas kui hinnaline materjal oli esmalt ainult varakate inimeste kasutuses, hiljem kui klaasi tootmine odavnes muutus see kättesaadavamaks ka vaesemale Rooma elanikkonnale. [23]

Rooma Impeeriumi kokkuvarisemist 5. sajandil pKr peetakse keskaja alguseks. Keskaja esimeses pooles valmistati klaasist erinevaid pudeleid, kausse, peekerid ja tasse jm taolist. Keskaja alguseks olid klaastooted jõudnud ka põhjaaladele. Viikingite haudadest on leitud hauapanustena klaasesemeid. Viikingite sõja- ja kaubateed ulatusid üle maailma ning tänu sellele jõudsid ka klaasesemed kaugele põhja. [24]

Kümnendal sajandil hakkas laiemalt levima ka aknaklaaside kasutamine. Põhiliselt kasutati värvilisi klaasi tükikesi katedraalide ja kirikute vitraažakende valmistamiseks. See oli ajaperiood, mil Euroopas hakkas laiemalt levima kristlus ning kiriku ja religiooni tähtsus ühiskonnas suurenes. Kirikute ja katedraalide vitraažidel kujutati pühakirjade lugusid või apostleid ja pühakuid. Teadaolevalt vanimad säilinud vitraažid on Augsburgi katedraali aknad, mis kujutavad viit prohvetit ja on valmistatud 11. sajandi lõpus. Cantenbury ja Chartresi katedraalides on säilinud mitmeid aknaid, mille valmistamise aeg ulatub 12. – 13. sajandisse. Chartresi katedraali 13. sajandist pärit klaasid on aga tänaseni tuntud oma suurejoonelisuse tõttu. Keskaja teist poolt peetaksegi vitraažikunsti hiilgeaegadeks. 13. sajandi teisest poolest on pärit ka üks maailma tuntuimaid katedraale ja Pariisi linna üks kuulsamaid maamärke, Notre-Dame katedraal. Notre-Dame katedraali värvilisest klaasist aknad on olnud ühed märkimisväärsamad omasuguste seas. Kahjuks hävis 2019. aasta aprillis toimunud tulekahjus suur osa hoone katusekonstruktsioone ning sellega koos ka mitmeid vitraažaknaid. [25]

Kui varem võis klaasi tootmise põhilisteks keskusteks pidada Vahemere põhjakaldal olevaid linnu, siis 12. sajandist alates sai selleks Euroopas Veneetsia. Veneetsias oli klaasi valmistamine oluline tööstusharu, mida reguleeris klaasivalmistajate gild. Gild kehtestas 1271. aastal seaduse, mis keelas klaasi valmistamise tehnoloogia ja klaasimeistrite

importimise teistesse riikidesse, et kaitsta oma ärisaladusi. 1291. aastal toimusid veel radikaalsemad muudatused, mille alusel koliti kogu klaasi tootmine üle Muranosse. Põhjenduseks toodi, et Veneetsia on ehitatud põhiliselt puitkonstruktsioonidele ning klaasiahjud võivad need süüdata. Veneetsia klaasivalmistamise hiilgeajad olid 15.-16. sajandil, kui leiutati selge klaas ehk „cristallo“. See võimaldas Murano klaasimeistritel hakata tootma peegleid. Veneetsia klaasitootmise allakäik algas 17. sajandil, kui Veneetsia kaotas järk-järgult oma tähtsuse kaubanduskeskusena. [26]

Samal ajal hakkas mujal Euroopas klaasi tootmine edenema. Itaalia kogenud meistrimehed rändasid põhjapoolsematele aladele, võttes endaga kaasa teadmised ja oskused professionaalsest klaasivalmistamisest. Sellel perioodil ehitati ka esimene klaasivabrik Ameerikasse, Jamestowni. 19. sajandi alguses tööstusrevolutsiooni ajal liikusid inimesed massiliselt innadesse. Tekkis vajadus uute eluasemete järele. Arenesid tööstusharud ja sh ka klaasitööstus. Lõppes klaasist pudelite ja anumate tootmine puhumise teel ning kasutusele võeti masinad. Sajandi teiseks pooleks olid kasutusel pool-automaatsed seadmed klaasi tootmiseks. 1902. aastal leiutas Irving W. Colburn klaasilehtede tootmise seadmed, mis võimaldasid aknaklaaside masstootmist. Kaks aastat hiljem patenteeriti automaatne pudelite puhumise seade. 1959. aastal leiutati uus klaasi tootmise seade, kus sulatatud klaas valati sulatatud metalli, tavaliselt tina peale. See tagas klaasi väga tasase pinna ning ühtlase paksuse [27]. Sarnast tehnoloogiat kasutatakse aknaklaaside tootmiseks tänapäeval. [20]

## **2.2 Klaasi ajalugu Eestis**

Klaasi tootmine Eestis algas 17. sajandil. Informatsioon klaasitootmise ja manufaktuuride kohta on aga puudulik ning seda tööstusharu arengut on vähe uuritud. Teadaolevalt oli esimene klaasimanufaktuur Hüti klaasikoda Hiiumaal. Hüti klaasikoda töötas aastatel 1628-1664 ning rajati Hiiu-Suuremõisa mõisa omaniku, Rootsi ettevõtja Jacob de la Gardie juhtimisel. Asukoht valiti seetõttu, et läheduses olid olemas kergesti kättesaadavad liiva- ja savivarud ning ümbruses oli palju metsa, millega sulatusahjusid kütta. Oluline oli meresadama lähedus, mis võimaldas valminud tooteid ilma suurema kulutusteta tehasest

klientidele saata. Peamiseks toodeteks Hütil olid pudelid, klaasnõud ning aknaklaas. Meistriteks olid rootslased ja sakslased ning suurem osa kaubast eksporditi Rootsi ja Venemaale. Aastaks 1644 oli Hüti klaasikoda üks suuremaid klaasitootjaid Põhja-Euroopas. [28]

18. sajandi keskpaigaks oli klaasi tootmine ja manufaktuuride moodustamine laienenud jõudsalt ka mandri-eesis. Erinevalt Hüti klaasikojast, mille toodang enamalt jaolt eksporditi, kuulusid mandri klaasikojad enamasti mõisakomplekside juurde, mis tähendas, et väga vähe klaasi toodeti müügiks. Kuna Eesti suurte mõisakomplekside põhisissetuleku allikas oli viin, siis seda oli vaja pudeldada ning klaaspudeleid toodeti just niipalju, kui omal vaja läks. Kõige rohkem klaasikodasid rajati Kesk-Eestisse. Vana-Põltsamaa, Kärevere, Puurmani ja Laeva mõisate ümbruses toimis 1760.-1780. aastatel kokku seitse klaasitehast, milles toodeti nii pudeliklaasi, aknaklaasi kui ka vähesel määral peegleid [29].

19. sajandil oli klaasitööstus Eestis üheks põhiliseks tööstusharuks mineraalide töötlemise vallas. Kõige suuremaks klaasitootjaks oli Amelungile kuuluv Rõika-Meleski peeglivabrik. Nende edukuse alus oli klaasisulatamise võimekuse maht. Sajandi esimesel veerandil toodeti 30 sulatist aastas ning sajandi lõpuks kuni 100 sulatist aastas. Samuti arendati Rõika peegliosakonna tehnoloogiat. Joonisel 1 on kujutatud Rõika-Meleski peeglivabrik. [30]



**Joonis 1.** Vaade Rõika-Meleski peeglivabrikule 1857. aastal [31]

Kui sajandi algul toodi oskustöölised enamasti veel Saksamaalt, siis sajandi teisel poolel koolitati juba suurem osa töolistest välja kohapeal. Rõika-Meleski klaasivabriku omaniku C. G. Amelungi eestvedamisel ning transpordivõimaluste parandamiseks, valmistati aurulaev, mis liikus liinil Tartu-Pihkva-Vasknarva ning oli esimene aurulaev Peipsi järvel. Lisaks Rõika klaasitööstusele valmistati 1830. aastatel Eestis klaasi Kärü, Vändra ning Lelle-Eidapere manufaktuurides. 1844. aastal rajas Amelung Vändrasse veel ühe aknaklaasi vabriku, kuna nõudlus aknaklaasi järele oli suurenenud. [30]

Klaasitööstust elavdas ka 1850. aastal kehtestatud uus Venemaa Keisririigi tollipoliitika. Kuni selle ajani kehtisid 1822. aastal kinnitatud tollitariifid, mis eelistasid siseturu nõudmisi ja keelatud oli näiteks peeglite sisseost. Selline poliitika elavdas klaasi tootmist ja võimaldas uute tehaste avamist, kuid tootmistehnoloogia areng ning tehniline võimekus takerdusid. Koos kaitsetollide vähendamisega nõudis valitsus ka tootmistehnoloogia uuendamist. Hinnad langesid ja tootmismahud suurenesid. Rõika-Meleski klaasivabrikus võeti sajandi teises pooles kasutusele klaasi puhumise asemel tahvelvalu ning olude sunnil tuli rekonstrueerida kogu tootmine. Tehnilised uuendused kasvatasid tehase toodangut ligikaudu 50%, kuid tööliste vähenes. 1861. aastal rajati Tallinnasse klaasitööstus, mis erines kõikidest varasematest Eestis toiminud tehastest selle poolest, et ahjude kütmiseks kasutati kivisütt. 1879. aastal lisandus Eestisse veel üks klaasitootja, tänapäevase Järvakandi klaasitehase eelkäija. Tehase sulatusahjud töötasid algusaegadel ahikütte meetodil, kuid 1890. aastal kasutati klaasi valmistamiseks juba gaasikütet. Tootmiseks vajalikud materjalid hangiti tehase lähedusest ning neid töödeldi vastavalt vajadusele kohapeal. [30]

1881. aastal algas klaasitootmises kriis, mis mõjutas oluliselt tööstuse edasist käekäiku. Olgugi, et väliskonkurents oli kahanemas, kuna sisseveotolle oli taaskord tõstetud, ei suutnud see turgutada kriisi sattunud tööstusharu. Kümnendil toimunud sündmused vähendasid klaasitööstuse, kui tööstusharu tähtsust, kuigi aknaklaasi tootmine suurenes. Seoses plekktaara kasutuselevõetuga tuli sulgeda mitmeid pudelitööstusi, nende hulgas Vändra pudelivabrik. [30]

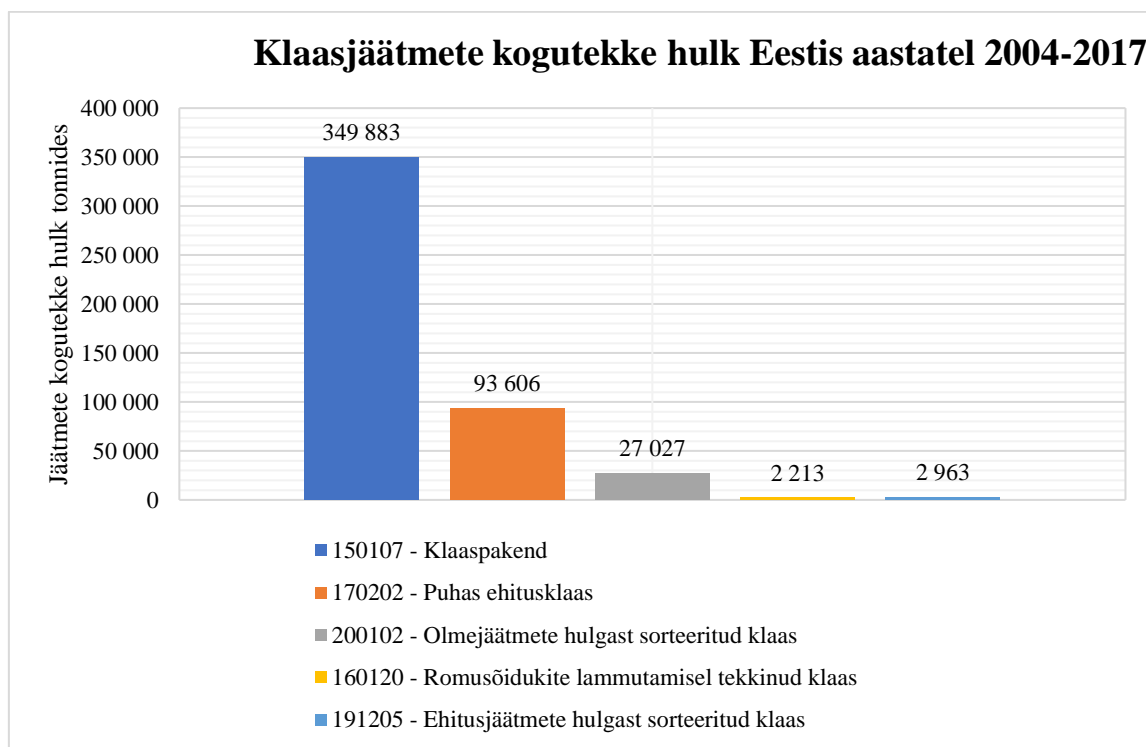
## 2.3 Klaasjäätmed Eestis

Klaas, nagu ka iga teine jääde, leiab lõpuks tee prügilasse või taaskasutamisesse. Eestis on jäätmete liigitamine ja nende määratlemine reguleeritud seadusandlusega. Eesti Vabariigi Jäätmeseaduse § 2 lõike 5 alusel on Keskkonnaministri poolt kehtestatud määrus nr 70 „Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu“ [32]. Määrus annab ülevaate sellest, kuidas nõuetekohaselt liigitada erinevaid jäätmeid ning määruse lisadesse kuuluv jäätmenimistu sisaldab ülevaadet jäätmeliikidest ning neile omistatud koodidest. Vastavalt määruses kehtestatud on jäätmeliigid jäätmenimistus määratud kuuekohalise koodinumbriga, kahe- ja neljakohaliste jäätmenimistu jaotiste ja alajaotiste koodinumbritega, mis tähistavad kolme liigitustasandit [32]. Koodi esimesed kaks numbrit näitavad jäätmeliiki. Jäätmeliike on jäätmenimistu põhjal kokku 20. Koodi kaks järgnevat numbrit näitavad jäätmete põhigrupi nimetust. Jäätmenimistust selgub, et klaasjäätmel on viie erineva koodiga. Nendeks on: „15 01 07 – klaaspakend; 16 01 20 – romusõidukid mitmesugustest liiklusvaldkondadest ning romusõidukite lammutamisel ja sõidukihooldusel tekkinud jäätmed; 17 02 02 – ehitusklaas (puhas ehitusklaas); 19 12 05 – ehitusjäätmete sorteerimisel välja sorteeritud klaas ja 20 01 02 – olmejäätmete hulgast välja sorteeritud klaas“ [32]. Eelnevalt loetletud koodide alusel on võimalik teha päringuid jäätmearuandluse infosüsteemis, et näha erinevate klaasjätmete statistilisi andmeid. Süsteemist on võimalik saada infot jäätmete kogutekkehulgast, impordi/ekspordi kogustest ning riikidest, kust imporditakse ja kuhu eksporditakse, taaskasutatud materjali hulgast, kõrvaldatud- või ladestatud jäätmete hulgast ja käideldud materjali hulgast. Samuti on võimalik näha iga jäätmeliigi jäätmete laoseisu aasta alguses ja ka aasta lõpus. Need on aruandja valduses olevad ning edasist käitlemisele suunamist või üleandmist ootavad jäätmekogused. [32-33]

Jäätmearuandluse infosüsteem võimaldab saada andmeid eri koodiga klaasjätmete tekke ja kasutamise kohta tonnides ajavahemikul 2004-2017.

### 2.3.1 Klaasjäätmete kogused Eestis aastatel 2004-2017

Jäätmearuandluse infosüsteemi andmetel on Eestis aastatel 2004-2017 klaasjäätmete koguste hulk olnud 475 692 tonni, kõigi erineva koodiga jäätmeliikide lõikes (joonis 2) [34].



**Joonis 2.** Klaasjäätmete koguteke Eestis aastatel 2004-2017 [34]

Jooniselt 2 näeme, et klaaspakendid moodustavad jäätmeliikide kogumahust suurima osa – 73,55%. Klaaspakendile järgneb 93 606 tonniga ehitusklaas, mille osa jäätmete kogumahus on 19,68%. Suuruselt kolmandaks jäätmehulgaks on olmejäätmetest tekkiv klaas, mis 27 026 tonniga moodustab koguhulgast 5,68%. Viimased kaks jäätmeliiki – romulates tekkivad klaasjäätmed (2 213 tonni) ning ehitusjäätmete sorteerimisel tekkinud klaasjäätmed (2 963 tonni) moodustavad kokku 1,09%. [34]

Vaadates jäätmete tekkimist aastate lõikes eraldi, on kõige suurema kogumahuga jäätmeliigi ehk klaaspakendi kogused olnud suurimad 2011. aastal (Tabel 1).

**Tabel 1.** Klaastaara pakendi jäätmete kogutekkehulgad aastatel 2004-2017 [34]

<b>Jäätmeliik</b>	<b>Aasta</b>	<b>Jäätme koguteke tonnides</b>
150107 Klaaspakend	2004	2 653,69
150107 Klaaspakend	2005	15 727,92
150107 Klaaspakend	2006	18 399,50
150107 Klaaspakend	2007	19 838,88
150107 Klaaspakend	2008	28 271,03
150107 Klaaspakend	2009	27 675,11
150107 Klaaspakend	2010	24 799,91
150107 Klaaspakend	2011	33 211,88
150107 Klaaspakend	2012	27 678,06
150107 Klaaspakend	2013	28 609,14
150107 Klaaspakend	2014	27 992,66
150107 Klaaspakend	2015	30 551,15
150107 Klaaspakend	2016	31 944,24
150107 Klaaspakend	2017	32 530,25

Tabelist 1 näeme, et pudeliklaasi jäätmete hulk on alates 2008. aastast väikeste kõikumistega püsinud 30 tuhande tonni ringis kogu aeg. Eestis ei kuulu tagasiostetava taara hulka purgid, veini-, šampuse- ja kange alkoholi pudelid, apteegitaara jm selline klaaspakend. Õllepudelid on aga pandimärgiga taara, seega neid peaks antud koguses olema vähe.

Tabelis 2 on toodud klaasjäätmete koguste muutused ehitusklaasi kohta (Tabel 2).

**Tabel 2.** Ehitusklaasi jäätmete kogutekkehulgad aastatel 2004-2017 [34]

<b>Jäätmeliik</b>	<b>Aasta</b>	<b>Jäätme koguteke tonnides</b>
170202 Ehitusklaas	2004	736,24
170202 Ehitusklaas	2005	1 590,95
170202 Ehitusklaas	2006	2 506,11
170202 Ehitusklaas	2007	2 636,55
170202 Ehitusklaas	2008	1 662,39
170202 Ehitusklaas	2009	2 257,52
170202 Ehitusklaas	2010	4 887,28
170202 Ehitusklaas	2011	13 294,49
170202 Ehitusklaas	2012	10 558,85
170202 Ehitusklaas	2013	18 534,25
170202 Ehitusklaas	2014	15 722,48
170202 Ehitusklaas	2015	6 381,34
170202 Ehitusklaas	2016	5 503,78
170202 Ehitusklaas	2017	7 333,83



Tabelist 2 näeme, et ehitusklaasi jäätmete hulk on kõige suurem 2013. aastal, kui kokku tekkis 18 534 tonni jäätmeid. Siit võiks järeldada, et majanduskasv sel ajal oli kõige kiirem. Alates 2015 aastast on ehitusklaasi kui jäätme osa püsinud enam-vähem samas mahu. See number näitab, et vanu aknaid vahetatakse oluliselt vähem, samas näitab aga uusehituste osatähtsuse tõusu. [34]

Romusõidukite lammutamisel ja sõidukite hooldamisel tekkinud klaasjäätmete hulk on olnud kõige suurem 2017. aastal, kokku 512 tonni. Kõigest 14 tonni väiksem oli see kogus aasta varem ehk 2016. aastal. 2008 oli romusõidukite lammutamisel klaasjäätmete koguseks 383 tonni. Vahemikus 2009-2015 toimus aga suur langus ning sellel perioodil koguti kokku summaarselt 765 tonni klaasi, mis on 245 tonni vähem, kui koguti kahe aasta jooksul, 2016. – 2017. aastani. Ehitusjäätmete sorteerimisel tekkinud klaasjäätmete kogus on olnud läbi aastate võrreldes teiste jäätmeliikidega madal, kuid aastatel 2007, 2008 ja 2009 on toimunud suuremad muutused jäätmete koguste osas. Aastal 2007 tõusis klaasjäätmete kogus 240 tonnini, mis võrreldes varasema aastaga tähendas 32-kordset kasvu. Aastal 2008 kasvas jäätmete hulk omakorda üle kolme korra, 761 tonnini ning aastal 2009 kasvas kogus juba 1 716 tonnini. Seejärel toimus aga jäätmete kogutekkes suur langus ning 2010. aastal oli selleks näitajaks kõigest 3,46 tonni ning vahemikus 2010-2017 oli kogusummaks kõigest 224 tonni. Sarnaselt on andmed olmejäätmetest sorteeritud klaasi kohta proportsioonidest väljas. Aastal 2004 on olnud olmejäätmetest sorteeritud klaasjäätmete koguseks 14 012 tonni ning aastatel 2005-2017 on jäätmete koguteke summaarselt 13 014 tonni. Selle erinevuse põhjuseks on 2004. aastal tehtud eksimus jäätmearuandluse esitamisel, kus Järvakandi klaasitehase aruandes esitati klaasjäätmete kogus vale koodiga. Kõigil järgnevatel aastatel on ettevõtte esitanud oma aruandluse õige koodi all ning sellest tulenevalt ka suur langus kogustes. [34]

### **2.3.2 Klaasjäätmete import ja eksport**

Lisaks jäätmete kogumisele ja töötlemisele toimub ka jäätmete sisse- ja väljavedu. Põhilisteks jäätmetega kauplemise sihtriikideks on Läti, Leedu, Ukraina, Šveits, Taani,

Venemaa, Türgi, Poola ja Suurbritannia. Väiksemal määral eksporditakse klaasjätmeid ka Indiasse ja Hongkongi. Eesti sisse- ja väljaveetavate jäätmete kogused on sõltuvalt jäätmeliigist erinevad (Tabel 3).

**Tabel 3.** Aastatel 2004-2017 imporditud ja eksporditud jäätmete kogused tonnides [34]

<b>Jäätmeliik</b>	<b>Imporditud jäätmete kogus tonnides</b>	<b>Eksporditud jäätmete kogus tonnides</b>	<b>Vahe tonnides</b>
<b>150107 Klaaspakend</b>	100 528,46	149 701,19	-49 172,73
<b>160120 Romuklaas</b>	0,00	0,00	0,00
<b>170202 Ehitusklaas</b>	3 909,96	43 306,12	-39 396,16
<b>191205 Ehitusjätmete hulgast sorteeritud klaas</b>	2 963,36	1 117,48	+1 845,88
<b>200102 Olmejätmete hulgast sorteeritud klaas</b>	276,10	8 625,81	-8 349,71

Tabelist 3 näeme, et Eestist väljaveetavate klaasjätmete hulk on sissetoodavate klaasjätmete hulgast suurem. [34]

### 2.3.3 Klaasjätmete käitlemine

Kui jäätmed on vastavatesse kogumiskohtadesse transporditud, tuleb need sorteerida ja suunata kas taaskasutamisesse või kõrvaldada ehk ladestada prügilatesse. Kuna klaasi taaskasutamise võimalused on aastatega laienenud ning klaasi on üldiselt lihtne taaskasutada, on ka taaskasutatavate jäätmete kogused suurenenud. Samas ei ole alati mõningatel põhjustel otstarbekas klaasi saata ümbertöötlemisse. Sellisel juhul ladestatakse materjal prügilasse ehk kõrvaldatakse. Jäätmearuandluse infosüsteem käsitleb aruandluses

jäätmete käitlemist kolmes paragrahvis. Selleks on 13 erinevat taaskasutamise toimingut, olmejäätmete kasutamine kütuseks või energiaallikaks ja jäätmete kõrvaldamistoimingud, mida on 15. [33] Aruandluses kajastatakse ka määratlemata käitlemist, mis kujutab endast viisi, kus jäätmekogused on käitlemiseks ette nähtud ettevõttele, kellel puudub aruandluskohustus. Samuti kuuluvad sinna alla need jäätmete kogused, mille puhul on jäätmete üleandmisel ja vastuvõtmisel eksitud partnerettevõtte määratlemisega. Tegelikult on suurem osa nendest jäätmetest reaalses elus leidnud oma tee taaskasutamiseni, kuid nende koguste kohta puudub dokumenteeritud tõestus või kinnitus aruandluses. [34]

Tabelis 4 on toodud aastatel Eestis 2004-2017 käideldud klaasjäätmete kogused ning nendega läbi viidud toimingud (Tabel 4).

**Tabel 4.** Aastatel 2004-2017 taaskasutatud, kõrvaldatud, prügilasse ladestatud või määratlemata käideldud klaasjäätmete kogused tonnides [34]

Jäätmeliik	Taaskasutatud jäätmete kogus tonnides	Kõrvaldatud jäätmete kogus tonnides	Prügilasse ladestatud jäätmete kogus tonnides	Määratlemata käideldud jäätmete kogus tonnides
<b>150107 Klaaspakend</b>	238 034,12	0,00	9,20	18 029,80
<b>160120 Romuklaas</b>	1 182,03	0,13	253,28	149,49
<b>170202 Ehitusklaas</b>	40 594,84	9,06	7 832,99	3 655,61
<b>191205 Ehitusjäätmete hulgast sorteeritud klaas</b>	104,47	0,00	82,14	30,88
<b>200102 Olmejäätmete hulgast sorteeritud klaas</b>	18 128,55	0,00	86,68	1 356,81
<b>Kokku</b>	298 044,01	9,19	8 264,29	22 222,59

Tabelist 4 näeme, et kokku on taaskasutatud, kõrvaldatud, ladestatud või määramata moel käsitletud 329 540,08 tonni jäätmeid aastatel 2004 - 2017. Liites kokku kõikide vaadeldava perioodi klaasjäätmete kogused ning imporditava materjali kogused ja lahutades sellest summast ekspordikogused, näeme, et aastatel 2004-2017 oli käideldav klaasjäätmete kogus kokku ca. 234 tuhat tonni. Seejuures tuleb ära märkida, et töödeldavate klaasjäätmete mahust 298 044 tonni kuulub puhtalt taaskasutamisesse. Sellest kõige suurema osa, 238 034 tonni, moodustab klaaspakend (Joonis 3). [34]



**Joonis 3.** 2004-2017 taaskasutatud klaaspakendi kogused aastate lõikes [34]

Jooniselt 3 on näha, klaaspakendite taaskasutamise trend on positiivne. Kuna klaaspakendi puhul on tegemist suures osas klaastaaraga, siis on ka mõistetav, et seda taaskasutatakse kõige rohkem, kuna Eestis on võrdlemisi hästi arenenud süsteem taara kogumiseks ning taaskasutusse suunamiseks. 2017. aasta lõpu seisuga võttis Eestis pandipakendeid vastu 807 kauplust ning kogu pandipakendite hulgast ligi 90% võetakse vastu läbi taaraautomaatide [35]. Seejuures täideti 2017. aastal taaskasutusmäär Eestis klaaspakendi osas 89% ulatuses, mis on väga kõrge näitaja [35]. Üldiselt on eestlaste käitumisharjumused seoses taara kogumise ja taaskasutamisesse suunamisega head, kuid oluliselt tõusnud alkoholiaktsiisid

ning piirikaubanduse elavnemine on hakanud tekitama vastupidist efekti. Kuna Lätist toodud taara ei kuulu Eestis asuvates taaraaparaatides tagastamisele, ei ole ka inimestel motivatsiooni selle nimel vaeva näha. See toob endaga kaasa aga suurema käitlemata jäätme hulga, mis tihtipeale satub loodusesse. Kuna pakendite tagastamise infrastruktuur on üles ehitatud mõttega, et kogu Eestis tarbitav taara tagastatakse ka Eestis, siis Lätist toodav alkoholitaara on tekitanud olukorra, kus hetkel toimiva struktuuri jaoks ei jätku enam piisavalt pakendeid. See aga omakorda tõstab oluliselt kulusid pakendite tagastamisel ja töötlemisel. [34, 35]

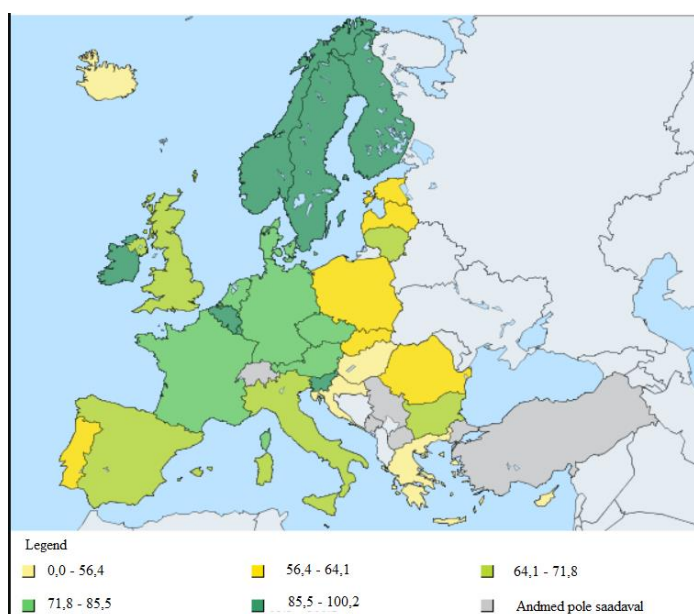
Kui klaaspakendeid taaskasutatakse pea täielikult, siis sama ei saa öelda ehitusest tekkiva puhta klaasjäätme kohta. Ka seda taaskasutatakse suurtes kogustes: 2014. - 2017. aastatel kokku 40 594 tonni, kuid samal ajal on selle jäätmeliigi prügilatesse ladestamise hulk võrreldes teiste liikidega kõige suurem. Kokku on erinevate liikide klaasjäätmeid ladestatud prügilatesse 8 264 tonni ning sellest 94,7% moodustab ehitusklaas. Tõsi, ehitusklaasi kogus, mis suunatakse prügilatesse ladestamisele ei ole klaasjäätmete koguhulka arvesse võttes suur, kuid sellest hoolimata on tegemist keskkonna seisukohalt suure numbriga. [34] Arvestades tänapäevaseid võimalusi ja meetodeid jäätmete taaskasutamiseks, on oluline saada ka see number võimalikult väikseks. Selles perspektiivis on klaasjäätmete kasutamise võimaluste uurimine betooni täitematerjali osalise asendajana oluline. Kuna betoon on kõige laialdasemalt kasutatav ehitusmaterjal, on jäätmeklaasi suunamisel betooni valmistamisesse võimalus laiendada klaasi taaskasutamise viise ja seeläbi vähendada keskkonnale mittesõbraliku jäätme hulka.

## **2.4 Klaasjäätmed maailmas**

Maailma rahvastikuarv on hetkel juba suurem kui 7 miljardit inimest. Sellega seoses on suurenenud ka jäätmete hulk. Maailmas toodetakse igal aastal ligikaudu 130 miljonit tonni klaastooteid, millest 48% on klaaspakendid, 42% on ehitusklaas, tahvelklaas ning ülejäänud 11% on muud klaastooted. Täna sel päeval töötab maailmas ligikaudu 1350 klaasitööstust ning kokku kasutatakse üle 2500 klaasisulatusahju. Toodetud klaasikogusega võrreldes

taaskasutatakse igal aastal maailmas vaid kõigest 27 miljonit tonni klaasi ehk 21% kogutoodangust. [36]

Euroopas on loodud ühised süsteemid ja võimalused jäätmete töötlemiseks ning üldine olukord jäätmekäitluse osas on hea. Euroopa klaasi kogutoodang aastal 2016. oli hinnanguliselt 8,8 miljonit tonni [36]. Euroopa Liidu 28 liikmesriigi ühine klaaspakendite taaskasutamise osakaal on 2016. aasta seisuga 74,1 % kogu kasutatud klaaspakenditest [37]. Selle näitajaga on Euroopa ka maailma kõige edukam klaaspakendite taaskasutaja. Seejuures tasub ära märkida, et riigid nagu näiteks Belgia, Rootsi, Luksemburg ja Sloveenia taaskasutavad kogutud klaaspakendeid 90 – 100% (Joonis 4) [37].



**Joonis 4.** Euroopa Liidu riikide klaaspakendi taaskasutusmäärad 2016. aastal [37]

Kõrged tulemused taaskasutamisel tagab Euroopa riikides edukalt toimiv kinnine süsteem, kus iga riigi klaaspakendite toodang on ette nähtud ka taaskasutamiseks. Samuti on suureks abiks olnud taaraautomaatide võrgustiku laiendamine.

Ameerika Ühendriikides tekkis 2015. aastal kokku 11,5 miljonit tonni klaaspakendi jäätmeid, mis moodustasid kõikidest olmejäätmetest 4,4% [38]. Sellest kogusest läks taaskasutamisele 3 miljonit tonni jäätmeid ning prügilatesse ladestati ligikaudu ülejäänud

jäätmed. See tähendab, et Ameerika Ühendriikides taaskasutatakse 26,4% klaaspakenditest, mis on Euroopaga võrreldes väga vähe. [38]

Ülejäänud maailma osas on võimatu teha järeldusi klaasi taaskasutamise osas. Veidi parem on olukord Aasia riikides, kus teatud määral on statistikat kogutud. On teada, et näiteks Hongkongis on olmejäätmetest sorteeritava klaasi taaskasutamise osakaal alla 5%, samal ajal on näiteks Lõuna-Koreas ja Jaapanis nendeks näitajateks vastavalt 65% ja 91% [39]. Klaasi taaskasutamine on vähene Türgis, kus taaskasutamisele suunatakse vaid 5% olmejäätmetest välja sorteeritud klaasist. [39] Klaasi ladestamine prügilatesse on tekitanud regioonis suuri keskkonnaprobleeme. Sarnaselt Aasiale puudub ka paljude Aafrika riikide osas täpsem informatsioon klaasjäätmete kohta. Küll aga on Aafrikas heaks eeskujuks Lõuna-Aafrika Vabariik, kus taaskasutatakse ligikaudu 41% klaasist, ning näitaja on aastatega läinud ainult paremaks [36].

Jäätmeprobleemide lahendamise tegeletakse kogu maailmas pidevalt, aga rahuldava olukorra saavutamiseni on veel pikk tee minna.

### **3. KLAASJÄÄTMETE KASUTAMINE BETOONIS NING BETOONI SURVETUGEVUST MÕJUTAVAD TEGURID**

#### **3.1 Klaasjäätmete kasutamine betoonis**

Klaasi, kui ühe enim levinud jäätmeliigi taaskasutamise võimaluste ja meetodite osas on välja töötatud erinevaid lahendusi. Klaas on üks lihtsamalt taaskasutatav jääde, kuid sellegipoolest maetakse suur hulk klaasi prügilatesse. Kuna klaas ei ole lagunev jääde, on selle matmine probleem. Samal ajal valmistatakse suurel hulgal ehitusmaterjale ja konstruktsioone betoonist. Betooni tootmiseks kulutatakse looduslikke taastumatuid maavarasid – liiva ja killustikku. Looduslikud maavarad hakkavad aga suure tootmismahu tõttu muutuma defitsiitseteks ning oluline on leida neile võimalikke alternatiive. Selleks, et vähendada klaasjätmeid ja lahendada süvenevat probleemi kahanevate loodusvarade osas, on hakatud uurima jäätmeklaasi kasutamise võimalikkust looduslike täitematerjalide asendamiseks betoonis. Uuringuid klaasi kasutamiseks betooni valmistamisel on tehtud palju ning lahendused ja tulemused on olnud erinevad, kohati vasturääkivad. Kõige rohkem on klaasjäätmete kasutamist betooni valmisatmisel uuritud piirkondades, kus jäätme probleem on oluliselt suurem kui Euroopas, eelkõige Aasia riikides.

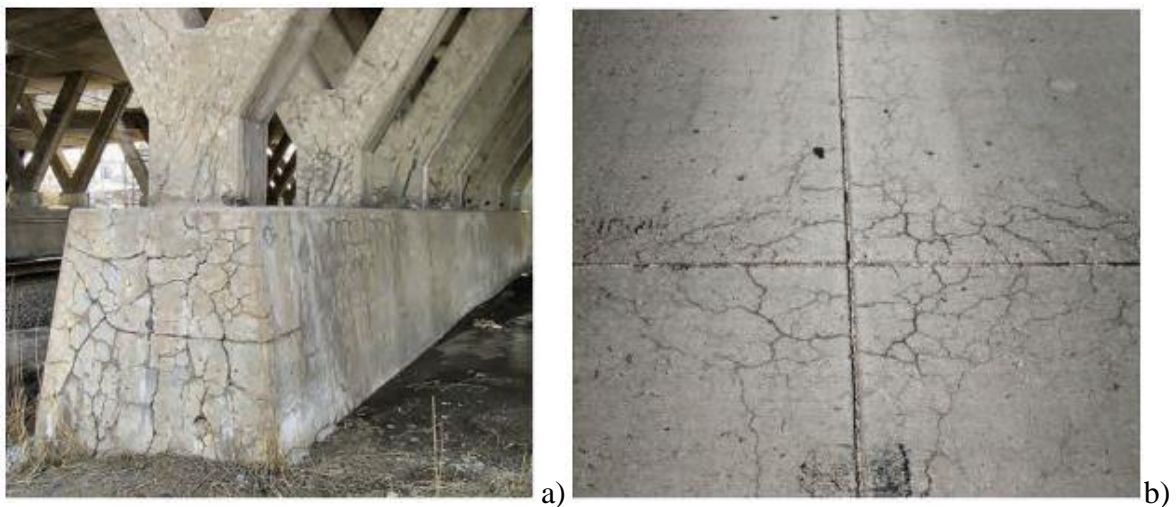
##### **3.1.1 Räni-leelise reaktsioon**

Betooni on kasutatud juba sajandeid ning ehitajad on sellesse alati suhtunud kui väga vastupidavasse materjali. 19. sajandi alguses jõuti aga arusaamale, et ka betooni tugevus võib erinevate tegurite, nagu näiteks merevee või külmumise tõttu kahaneda. 1920. aastatel tulid teated Californiast, et mitmetel betoonkonstruktsioonidel on tekkinud mõned aastad peale valmimist kummalised praod. Imelikumaks muutis olukorra ka asjaolu, et kõik betooni



valmistamiseks kasutatud materjalid vastasid nõuetele. Alles 1940. aastal jõuti järeldusele, et tegemist on nähtusega, mida nimetati räni-leelise reaktsiooniks, mille tekkepõhjuseks peeti ränimineraalide sisaldust betooni jämetäitematerjalis ning nende keemilist reaktsiooni tsemendi tõttu aluseliseks muutunud veega. Reaktsiooni tulemusena moodustub betoonis geelilaadne ollu, mis väljast lisanduva niiskuse mõjul paisub ning tekitab betoonis pragusid. Pärast räni-leelise reaktsiooni avastamist asuti seda kohe uurima. Esialgu keskenduti uuringutele põhiliselt Ameerikas, kus ka esimesed probleemsed konstruktsioonid avastati. Hiljem hakati nähtust uurima ka Euroopas ja mujal maailmas. Ajalooliselt on räni-leelise reaktsiooni tekkepõhjuseid ning reaktsiooni olemust ja selle mõju betoonile uuritud väga palju, kuid sellest olenemata on räni-leelise reaktsioon tänapäeval vähetuntud probleem. [40]

Räni-leelise reaktsiooni teket on võimalik tuvastada vaid betooni väga põhjaliku uurimise tulemusena. Kõige paremini iseloomustab betoonis toimuvat reaktsiooni betooni pinna pragunemine kaardivõrgustiku taolise mustrina. Sellele järgneb pragude avanemine pinnal ning värvimuutused, nagu on näha jooniselt 5a ning jooniselt 5b (Joonis 5). [41]



**Joonis 5.** Räni-leelise reaktsiooni poolt põhjustatud kahjustused betooni pinnal [41]

Joonistelt on võimalik näha räni-leelise reaktsiooni poolt põhjustatud kahjustusi betooni pinnal. Pinnal olevate pragude pilt on teistsugune, kui pragunemine, mis on tekkinud soolade, ülekoormuse, külmumis/sulamistsüklite vaheldumisel või teiste tavaliselt betooni kahjustavate nähtuste toimel. [41]

Räni-leelise reaktsioon on betooni vastupidavust silmas pidades väga tõsine probleem, seetõttu on hakatud seda ka rohkem uurima. Kuna tegemist on reaktsiooniga, mis tekib eelkõige niiskes keskkonnas, siis kõige suurema tõenäosusega esineb reaktsioon sildade ja veega kokkupuutuvate rajatiste konstruktsioonides. Soomes viidi läbi uuring, kus vaadeldi räni-leelise reaktsiooni esinemist betoonkonstruktsioonidest sildadel, mis olid ehitatud vahemikus 1912 – 1999. Kokku uuriti 97. erinevat silda, mis asusid Lõuna-Soomes või Edela-Soomes. Uuringu eesmärgiks oli leida sillad, millel esinevad räni-leelis reaktsiooni kahjustused ja siduda kahjustuste ilmnemine sildade geograafilise asukoha ja vanusega. Sildade betoonkonstruktsioone vaadeldi mikroskoopide abil. Oluline oli seejuures eristada räni-leelise reaktsiooni põhjustatud pragunemist betooni külmakahjustustest. Külumise põhjustatud praod on kõige intensiivsemad betooni pinna lähedal, samas kui räni-leelise reaktsiooni poolt põhjustatud praod jooksevad ühtlasemalt ning sügavamale betooni sisse. Uuringu tulemused näitasid, et kokku avastati räni-leelise reaktsiooni olemasolu 27 silla konstruktsioonis. Geograafiliselt asus suurem osa kahjustustega sildadest ühes piirkonnas, Helsingi ümbruses. Sildade vanuselises võrdluses esines reaktsiooni põhjustatud kahjustusi kõige enam konstruktsioonides, mis olid valmistatud 1970. aastatel. Sellele järgnesid sillad, mis olid ehitatud 1960. aastatel. Samuti avastati kahjustusi 1980. aastatel ehitatud sildadel. Tabel 5 annab ülevaate sildade vanuselisest võrdlusest ning nendel esinenud räni-leelise reaktsiooni põhjustatud kahjustustest (Tabel 5). [42]

**Tabel 5.** Räni-leelise reaktsiooni tunnusega sildade arv Soomes ja nende ehitamise aeg [42]

Kümnend, mille jooksul sillad on ehitatud	Ehitatud sildade arv	Sildade arv, kus avastati räni-leelise reaktsiooni tunnused
1910	2	0
1920	1	0
1930	3	1
1940	1	0
1950	9	0
1960	33	6
1970	38	16
1980	8	3
1990	2	1
Kokku	97	27

Olgugi, et räni-leelise reaktsiooni poolt põhjustatud kahjustusi leiti kokku 27. sillal, ei esinenud ühelgi neist betoonipindade purunemist. Kõik kahjustused leiti kasutades mikroskoopi ning sellest järeldati, et reaktsioon on alles tekkefaasis, kuna 42 aastat peale valmimist ei olnud suuri muutusi toimunud. Võrreldes kirjandusest saadud andmetega, on Soomes ehitatud konstruktsioonides räni-leelise reaktsiooni tekkeage oluliselt pikem. Selle üheks põhjuseks peetakse graniidi kasutamist betooni täitematerjalina, mis on hinnatud väheaktiivseks täiteaineks. Küll aga tähendab pikk reaktsiooni algusaeg seda, et sillad, mis on ehitatud 1960. - 1970. aastatel hakkavad nüüdseks jõudma vanusesse, kus räni-leelise reaktsiooni arenemine võib kujutada konstruktsioonidele ohtu. [42]

Bologna ülikoolis läbi viidud katsetega uuriti räni-leelise reaktsiooni teket betoonis, kus kasutatakse täitematerjalide asendamiseks purustatud jäätmeklaasi. Klaasi valmistatakse erinevaks otstarbeks ning sõltuvalt sellest erinevad ka klaasi valmistamismeetodid ja selle keemiline koostis. Uuringus kasutati tavalist klaasi, mille koostises oli ränidioksiidi, soodat ja lupja, boorsilikaatklaasi ja klaasi, kuhu oli lisatud tina. Purustatud klaasjäätmetega asendati betoonis liiva kuni 35% ulatuses kogumassist. Katsete läbiviimiseks valmistati prismad mõõtmetega 40 x 40 x 160 mm ning neid hoiti üks päev 25 °C ja 100% õhuniiskuse juures. Seejärel kuivatati katsekehad ning pandi nad 240-ks päevaks NaOH lahusesse temperatuuril 80 °C. Seejärel vaadati elektronmikroskoopi ja röntgen spektroskoopi kasutades kas mört on paisunud ning hinnati räni-leelise reaktsiooni teket. Katsete tulemused näitasid, et katsekehade paisumine vastas ette antud normidele. Ainsaks erinevuseks oli boorsilikaatklaas, kus 10% ulatuses klaasijäätmete asendamine liivaga andis tulemuse, mis ületas ettenähtud piiri. Veel selgus, et mida suurem oli jäätmeklaasi hulk liiva asendajana, seda suurem oli paisumine, aga seegi sõltus omakorda kasutatud klaasi keemilisest koostisest. Paremad tulemused andis tavaline klaas. Selle kasutamisel võis liiva asendada kuni 35% kogu massist. [43]

Betooni täitematerjali standard EVS-EN 12620:2005+A1:2008 toob välja võimalused räni-leelise reaktsiooni mõjude vähendamiseks. Standardis nimetatud ettevaatusabinõud soovivad piirata betoonisegu üldist leeliselisust, kasutades madala leeliselisusega tsementi, kasutada leelistega mittereageerivaid täitematerjale või piirata betooni veega küllastumise astet. [44]

### 3.1.2 Klaasjäätmete kasutamine tsemendi osalise asendajana

Klaasjäätmete kasutamine betoonis võib toimuda mitmel erineval kujul. Üheks variandiks on klaasijäätmete kasutamine tsemendi asemel. Suurte kildudena klaas betoonisega ei nakku kuigi hästi, kuid peeneks jahvatatuna on klaasi võimalik kasutada tsemendi asemel.

Kanadas tehti katsed, kus betoonis kasutatav portlandtsement asendati 30% ulatuses massist purustatud klaasiga. Klaaspuru jaotati kolme erinevasse fraktsiooni, suurusega vastavalt 150- $\mu$ m, 75- $\mu$ m ja 38- $\mu$ m. Eesmärgiks oli saavutada katsekehade survetugevus 25 MPa peale kehade 28 päevast kivistumist. Katsetulemustest selgus, et mida peenemaks oli jahvatatud klaasipuru, seda paremini toimis materjal tsemendi asendajana. Katsekehade survetugevused jäid soovitud piiridesse ning survetugevuse muutumine aja jooksul andis positiivse trendi. Kõige kehvemad tulemused saadi kõige suurema fraktsiooniga klaasipuru kasutamise korral. Samuti leiti, et klaasi peenestamine aitab vältida räni-leelise reaktsiooni ning kohati isegi vähendada paisumist. Sellest järeldati, et klaasjäätmete kasutamine tsemendi asendajana on arvestatav lahendus. [45]

Bangladeshis läbi viidud sarnane uuring kinnitas samuti, tsementi saab edukalt asendada peeneks jahvatatud klaasjäätmega. Läbi viidud katsetes asendati tsementi jahvatatud klaasiga kuni 20% ulatuses selle massist. Vastavalt standardi nõuetele valati betoonisegu 50 x 50 x 50 mm suurustesse terasvormidesse ning jäeti peale 24h möödumist ja vormidest eemaldamist seisma. Valmistatud katsekehad purustati pärast 7, 14, 28, 56, 90, 180 ja 365 päevast kivistumist. Eesmärgiks oli saavutada survetugevus 35 MPa. Katsetulemused näitasid, et tsemendi asendamine 20% ulatuses selle massist klaasjäätmega andis kõige parema survetugevuse kõikidest katsetatud variantidest 365 päeva möödumisel. 180 päeva möödudes olid parema survetugevusega katsekehad need, milles tsement oli asendatud klaasipuruga 15% ulatuses tsemendi massist. Võrreldes kontrollkehadega, olid ka 90-ne ja 180-ne päevaste kehade survetugevused väga väikeste erinevustega. Tulemustest järeldati, et purustatud klaasi annab edukalt kasutada selle putsolaansete omaduste tõttu tsemendi asendajana. Optimaalseks asenduskoguseks pakuti 20% tsemendi massist.

Sarnaselt Kanadas tehtud uuringule märgiti ka selles töös, et räni-leelise reaktsiooni on võimalik vältida, kuid täiendavad uuringud selles osas on vajalikud. [46]

Kuigi uuringud näitavad, et tsementi on võimalik asendada klaasjäätmatega, on selle eelduseks äärmiselt peeneks jahvatatud klaas, mis nõuab suurtes kogustes energiat ja ei ole selle tõttu keskkonnasõbralik. Samas on 20-30% ulatuses tsemendi asendamine klaasiga jäätmekäitluse seisukohalt väga arvestatav kogus. Teades, et betooni tootmismahud maailmas on äärmiselt suured, on selline klaasi taaskasutamise variant lootustandev võimalus tulevikus ladestatavate klaasjäätmete koguse vähendamiseks. Meetodi eeliseks on ka võimalus vältida pea täielikult räni-leelise reaktsiooni, mis võib klaasi jämetäitematerjalina kasutamisel osutada pikas perspektiivis probleemiks.

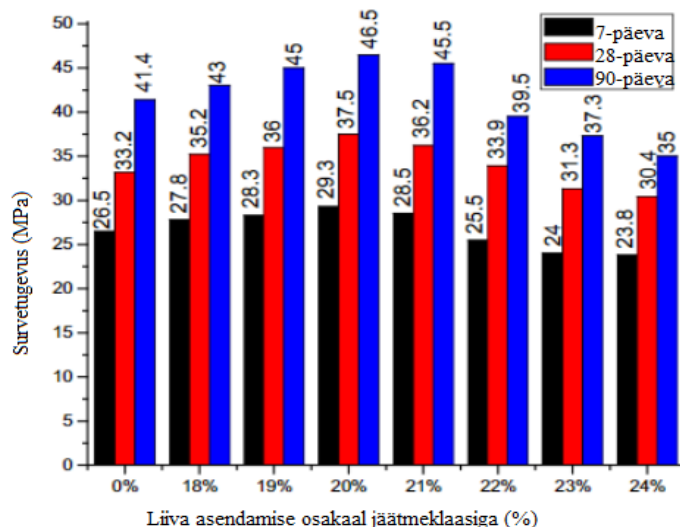
### **3.1.3 Klaasjäätmete kasutamine täitematerjalide osalise asendajana**

Klaasi saab taaskasutada betooni täitematerjalide asendajana purustades seda erineva suurusega fraktsioonideks. Selle meetodi eeliseks on see, et taaskasutada saab praktiliselt igat tüüpi klaasi, olgu selleks siis ehitusklaas, klaastaara, lambipirnidest tekkiv klaas või muul kujul esinev klaasjääde. Olenemata jäätmeklaasi tüübist tuleb selle kasutamiseks siiski teostada teha eeltööd, millest üks on klaasi pesemine, sest jäätmeklaasid võivad olla saastunud mitmete erinevate ainetega, mis võivad mõjutada betooni tugevust või selle kvaliteeti. Klaasi liigist sõltub see, kas jäädet kasutada peen- või jämetäitematerjalina. Pudeliklaas ei purune reeglina ühtlaselt ning klaasikillud on võrdlemisi teravad ja ebakorrapärased. Sarnane on olukord ka näiteks aknaklaasi purustamisel. Seetõttu on seda tüüpi klaasi otstarbekas kasutada väiksema fraktsiooniga täitematerjalina.

Nigeerias, Covenanti ülikoolis viidi läbi katsed klaasi kasutamise võimalikkuse väljaselgitamiseks betoonis liiva asendajana. Jäätmeklaasi kasutati katsekehades 25%, 50%, 75% ja 100% ulatuses liiva massist ning eesmärgiks oli saavutada betooni survetugevus 20 MPa peale kehade 28 päevast kivistumist. Kokku valmistati 60 katsekeha, mis purustati survetugevuse määramiseks 3, 7, 28 ja 90 päeva möödumisel. Katsekehade mõõdud olid standardile vastavalt 150 x 150 x 150 mm. Tulemused näitasid, et jäätmeklaasi koguse

suurendamisel halvenes betoonisegu töödeldavus. Betooni survetugevuse katsed näitasid, et klaasijäätmete lisamisel kuni 50% ulatuses massist olid katsetulemused võrreldes kontrollkehadega head. Katsekehade, kus liiv oli asendatud 25% ja 50% ulatuses massist, oli survetugevus 28 päeva vastavalt 23,9 MPa ja 23,3 MPa, olles seejuures 20% suurem, kui seda oli kontrollkehad survetugevus. Kehad, kus oli kasutatud 75% ja 100% jäätmeklaasi, saavutasid peale 28 päevast kivistumist survetugevuse vastavalt 18,86 MPa ja 13,63 MPa, olles seejuures kontrollkehad survetugevusest 6% ja 32% nõrgemad. Katsekeha, kus jäätmeklaasi sisaldus oli 75% saavutas aga kontrollkehadega võrreldava survetugevuse pärast 90 päeva möödumist. Saadud tulemustest järeldati, et klaasi on otstarbekas kasutada keskkonnasõbraliku betooni valmistamiseks liiva asendajana kuni 50% ulatuses liiva massist. Seejuures märgiti, et optimaalseks koguseks on 25%, mis tagaks ka jätkusuutliku keskkonnasõbraliku betooni valmistamise. [47]

Sarnased katsed viidi läbi ka Indias, Malavaviya Rahvusvahelises Tehnikainstituudis, kus katsetati liiva asendamist betoonisegus purustatud pudeliklaasiga. Eesmärgiks oli välja selgitada, kui suures koguses on võimalik taaskasutada klaasjäätmeid betooni valmistamisel ning selle mõju betooni omadustele. Valmistati katsekehad, kus liiva asendati purustatud klaasiga 0%, 18%, 19%, 20%, 21%, 22%, 23% ja 24% ulatuses massist. Betoonisegule lisati ka plastifikaatorit. Katsekehadega teostati survetugevuse katsed ning katsed kehade veeimavuse väljaselgitamiseks. Katsed viidi läbi peale 7, 28 ja 90 päeva möödumist alates kehade valmistamisest (Joonis 6).



**Joonis 6.** Katsekehade survetugevus 7, 28 ja 90-päeva möödudes [48]

Joonisel 6 toodud tulemused näitasid, et klaasikoguste suurendamine betoonisegus üle 22% massist vähendasid betooni survetugevust võrreldes kontrollkehadega. Katsekehad, kus liiva oli asendatud klaasipuruga kuni 22% ulatuses näitasid kõikidel ajahetkedel tehtud survetugevuskatsete põhjal paremat survetugevust, kui see oli kontrollkehadel. [48]

Liiva asendamine 20% ulatuses klaasiga andis peale 28 ja 90 päevast kivistumist survetugevuse näitaja, mis oli vastavalt 12,75% ja 12,32% parem, kui see oli kontrollkehal. Survetugevus kehadel, milles oli liiv asendatud 21% ulatuses massist, vähenes võrreldes 20% klaasisisaldusega kehadega, kuid oli sellest hoolimata 9,04% kõrgem kui kontrollkehal. Sarnaselt survetugevusele suurenes kuni 22% ulatuses klaasi kasutamisega ka kehade paindetugevus. Veel täheldati, et klaasikoguse suurenemisel suurenes ka katsekehade veeimavus. Kokkuvõtvalt järeldati, et liiva asendamine betoonisegus jäätmeklaasiga annab soovitud tulemusi kuni 21% asendamise juures ning võib seeläbi olla üheks võimaluseks taaskasutada jäätmeklaasi. [48]

Portugalis, Lissaboni Tehnikaülikoolis läbiviidud katsetega uuriti aknaklaasi ja autoklaasi purustamisel saadud materjali võimalikku kasutamist betooni valmistamisel. Seejuures asendati nii liiva kui ka jämetäitematerjali klaasiga. Betoonisegu koostised olid erinevad. Valmistati katsekehad, kus kasutati nii liiva kui ka jämetäitematerjali asendamiseks klaasi proportsioonides 5%, 10% ja 20% täitematerjalide kogumahust. Samuti valmistati katsekehad, kus kasutati klaasi ainult liiva asemel ja kehad, kus kasutati klaasi ainult jämetäitematerjali asemel. Katsetulemused näitasid, et klaasikoguste suurendamisega betoonisegus väheneb betooni survetugevus. Selle põhjuseks võib olla klaasi ja tsemendi halb nakkumine. Katsekehad, kus jämetäitematerjali asendati 20% ulatuses mahust klaasiga andsid survetugevuse võrdlemisel kontrollkehadega 3% kehvema tulemuse, samas, kui kehad, milles asendati liiva ning kehad, kus asendati liiva ja jämetäitematerjali koos, vähenes survetugevus vastavalt 14% ja 22%. Veel leiti, et betoonisegus kasutatavate klaasiosakeste suurus mõjutab mördi töödeldavust. Kehad, kus klaasi kasutati korraka liiva ja killustiku asendamiseks, töötasid paremini veeimavuse osas. Kokkuvõtvalt leiti, et kuigi betooni survetugevus väheneb, on suurema klaasifraktsiooni kasutamine otstarbekam ning annab paremaid tulemusi survetugevuse osas. Leiti ka, et klaasi kasutamine ei avalda suuremat mõju betooni vastupidavusele ning on arvestatav variant jäätmete taaskasutamiseks. Samuti leiti, et betoonisegus kasutatud klaas ei olnud piisavalt aktiivne, et oleks tekkinud räni-leelise reaktsiooni oht. [49]

Betooni kasutatakse väga mitmetel erinevatel eesmärkidel. See ei pea alati olema konstruktsioon, millest lähtutakse. Eesmärgil võib olla ka esteetiline või kaitse- või arhitektuurne väljund. Teadlased on uurinud võimalust kasutada jäätmeklaasi näiteks tuumaelektrijaamade või radioaktiivsete ainete ladestuskohtades. Lõuna-Koreas läbiviidud uuringutega sooviti selgitada, kas klaasjäätmeklaasi betoonis peentäitematerjalina kasutades on võimalik rajada sulfaatidele ja kloriididele vastupidavaid konstruktsioone. Tuumajaamade ümbruses on konstruktsioonide vastupidavus nendele keemilistele ühenditele oluline, et tagada kaitse radioaktiivse kiirguse eest. Selleks kasutati kineskoopitelerite ekraanide elektronkiiretoru. Kuna tööstuslikke jäätmeklaasi on alati keerulisem taaskasutusse saata, sest need ei ole reeglina puhtad ning nõuavad seetõttu suuremat eeltöötlust, ladestatakse just tööstuslikke jäätmeklaasi väga suurtes kogustes prügilatesse. Teadlased valisid elektronkiiretoru ka seetõttu, et peale digitaaltelevisioonile üleminekut 2012. aastal hakati Lõuna-Koreas vanu telereid massiliselt välja vahetama. See tõi kaasa suure jäätmeevoo, mis ennustatavalt 2020. aastaks suureneb veel kümnekordselt. Selline jäätmekogus tekitab loomulikult suure probleemi, sest olgugi, et kineskoopitelerite komponente on võimalik edukalt taaskasutada, seda siiski ei tehta. Katsetes purustati elektronkiiretoru ning betoonisegusse valiti ainult see klaas, mis läbis 5 mm suuruse avaga sõela. Lisaks kasutati betooni õhku lisavat ja veevajadust vähendavat polükarbonaati. Liiv asendati katsekehades purustatud klaasiga 0%, 50% ja 100% ulatuses peentäitematerjalide massist. Valmistati katsekehad külmaskindluse hindamiseks, sulfaadi- ja kloriidikindluse hindamiseks ning survetugevuse ja veeimavuse katsete jaoks. Katsetulemused näitasid, et betooni surve- ja paindetugevus purustatud klaasi koguste suurendamisel vähenesid. Selle põhjuseks peeti asjaolu, et klaasikildude nakkeomadused on kehvemad, kui looduslikul täitematerjalil ning seetõttu kannatas ka betooni tugevus. Küll aga näitasid katsed, et klaasiga betoonil oli hea külmaskindlus. Samuti näitasid katsed, et mida suuremas koguses klaasjäätmeklaasi lisati betooni, seda suurem oli betooni sulfaatide ja kloriidide kindlus. Seeläbi leiti, et elektronkiiretoru purustamisel saadud klaasi kasutamine radioaktiivseid materjale ümbritsevates betoonkonstruktsioonides on üheks heaks lahenduseks jäätmeklaasi võimalikul taaskasutamisel. [50]



## **3.2 Betooni koostisosad, mis mõjutavad betooni survetugevust**

Betoon koosneb mitmetest erinevatest komponentidest. Nende komponentide koosmõju tagab betoonisegu töödeldavuse, annab kivistunud betoonile tugevuse ja tagab betooni sihipärase töökindluse. Betooni koostisosad on tsement, täitematerjal ja vesi. Kuna tsementi ja täitematerjale on väga mitmeid erinevaid tüüpe, mis kõik toimivad betoonisegus erinevalt, mõjutab iga materjal oluliselt ka betooni survetugevust. Samuti avaldab betooni tugevusele ja selle kvaliteedile mõju ka vesi, mille ülesanne on tsemendi ja täitematerjalide sidumine. Mördi valmistamiseks kasutatava vee kvaliteet ning selle keemiline koostis mängib olulist rolli betooni sihipärase toimimise tagamisel. On oluline mõista, millised on iga erineva komponendi omadused ning nende tähtsus betoonis.

### **3.2.1 Tsement**

Tsement on üheks betooni koostisosaks, mis tagab sideainena betooni kõvaduse ja tugevuse saavutamise [51]. Tsement on hüdrauliline sideaine, mis veega segatuna moodustab tarduva massi ning säilitab pärast kivinemist oma tugevuse ja stabiilsuse ka vee all [52]. Eestis kasutatakse põhiliselt Portlandtsemente. Vastavalt EVS EN 197-1:2011 standardile määratletakse ära 27 erinevat hariliku tsemendi tüüpi ning nende koostisosad. Need on omakorda jaotatud viieks põhigrupiks:

- CEM I – Portlandtsement,
- CEM II – Portland – komposiittsement,
- CEM III – Räbutsement,
- CEM IV – Putsolaantsement,
- CEM V – Komposiittsement.

Tsemendi normtugevuseks loetakse 28-päevast survetugevust ning käsitletakse kokku kolme normtugevusklassi: klass 32,5, klass 42,5 ja klass 52,5. Lisaks määratakse ka tsemendile

eeltugevusklassid, ehk kivistumiskiirus, mida on iga normtugevusklassi kohta kolm tükki. Need jaotatakse vastavalt madala kivistumiskiirusega (tähis N), kõrge kivistumiskiirusega (tähis R) ja väikese kivistumiskiirusega (tähis L). Tsemendi eeltugevuseks peetakse 2-päevast või 7-päevast survetugevust (Tabel 6). [52]

**Tabel 6.** Tsemendi normväärtusena määratud mehaanilised ja füüsilised nõuded [52]

Tugevus- klass	Survetugevus MPa				Tardumise algus	Mahu- püsivus (paisumine)
	Eeltugevus		Normtugevus			
	2-päevane	7-päevane	28-päevane		min	mm
32,5 L <sup>a</sup>	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L <sup>a</sup>	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L <sup>a</sup>	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				

<sup>a</sup> Tugevusklass on ette nähtud ainult CEM III tsementidele.

Tabelist 6 on näha erinevate tsemendi tugevusklasside normväärtused. Betooni tugevusklass sõltub otseselt tsemendi tugevusklassist. Samuti tuleb tsemendi valikul tähele panna tsemendi eeltugevust. Seega on betooni nõutud survetugevuse tagamiseks oluline valida eesmärgile vastav tsemendi liik ja sobiv tsemendi koostis.

### 3.2.2 Liiv

Liiv täidab betoonis tsemendi ja jämetäitematerjali vahelised tühimikud ning on betoonisegu oluliseks osaks. Liiva kvaliteet ja selle koostis võivad mõjutada betooni survetugevust. Puhas liiv reeglina betooni survetugevusele mõju ei avalda, kuid kui liiva hulka on sattunud savi, muda või huumust, võib muutuda ka betooni survetugevus. Rwanda ülikoolis tehtud

katsed näitasid, et savi lisamine betoonisegule isegi 10% ulatuses vähendab betooni survetugevust kuni 18% [53]. Ghanas tehtud uuring näitas, et isegi juba liiva saastumine 4% ulatuses kogumahust vähendab oluliselt betooni survetugevust [54]. Seega on betooni survetugevuse tagamiseks oluline, et segus kasutatav liiv oleks puhas ja saastamata.

### **3.2.3 Jämetäitematerjal**

Jämetäitematerjalina kasutatakse betooni valmistamiseks tavaliselt lubjakivi- või graniitkillustikku. Jämetäitematerjali osakaal betoonisegus on kõige suurem, seega on selle omaduste mõju betooni kvaliteedile ja tugevusele suur. Jämetäitematerjali puhul avaldavad betooni survetugevusele mõju mitmed erinevad faktorid. Olulisel kohal on jämetäitematerjali enda tugevus. Mida suurem on betoonis kasutatava jämetäitematerjali tihedus, ehk tugevus, seda suurem on tõenäosus, et ka betooni survetugevus tõuseb. Samuti mõjutab betooni survetugevust täitematerjali fraktsioon. Arvamused jämetäitematerjali fraktsiooni täpse mõju osas betooni tugevusele on aga vastakad. Osad teadlased väidavad, et väiksema fraktsiooniga betooni tugevus on suurem, samas väidetakse ka vastupidist, et suurema fraktsiooniga täitematerjali kasutamine tagab betoonile suurema tugevuse. Kansase Ülikoolis läbi viidud katsetes, kus uuriti betooni täitematerjalide mõju betooni tugevusele leiti, et fraktsioonide suuruse vahe ei avaldanud betooni survetugevusele väga olulist mõju. Betoonis kasutati jämetäitematerjalina basaltkivikillustikku ning lubjakivikillustikku, maksimaalsete fraktsioonidega 12 mm ja 19 mm. Samas töös jõuti järeldusele, et basaltkivikillustikuga valmistatud betooni survetugevus on suurem, kui lubjakivikillustikuga valmistatud betooni puhul. Lubjakivikillustiku kasutamine tavabetooni valmistamiseks osutus aga täiesti piisavaks, ning tugevama kivimi, ehk basaltkivi kasutamine osutus paremaks ja otstarbekamaks vaid kõrgema tugevusklassiga betooni valmistamisel. Seejuures märgiti ka, et väga oluline on betooni tugevuse tagamisel vesitsement tegur. [55]

### **3.2.4 Vesi**

Vesi on betooni valmistamise üks komponent. Vee toimetel seotakse omavahel tsement ning täitematerjalid. Betoonisegus kasutatava vee kvaliteet on oluline, sest see mõjutab betooni survetugevust. Tavapäraselt kasutatakse mördi valmistamiseks harilikku joogivett, reeglina kraanivett, mille kvaliteet on piisav. Kraanivee kvaliteet ja selle keemiline sisaldus erineb teatud piirkondades ning seega oleks hea enne betoonisegu valmistamist välja selgitada kohaliku kraanivee omadused. Kasutada ei tohiks üldjuhul soolade sisaldusega vett, eriti kui betooni armeeritakse terasarmatuuriga. Soolade sisaldus vees võib vähendada betooni survetugevust 10 – 30%. Seda on näidanud ka probleemid mereäärsete ehitistega. Probleemsed on ka troopilised piirkonnad, kus pole looduses sageli joogivett. Veenduda tuleks vee puhtuses, sest ainult puhas ja sobiva pH taseme ja keemilise koostisega vesi tagab kvaliteetse betoonisegu. [56]

## **3.3 Katses kasutatud materjalid ja nende kirjeldus**

Katses kasutatud materjalid valiti vastavalt Kotton Betooni OÜ tootmisjuhi soovile. Tema soov oli saada informatsiooni, kas jäätmeklaasi lisamine betoonisegule või jämetäitematerjali osaline asendamine klaasiga annab välja kandekonstruktsioonide nõutava survetugevuse C30/37.

Katsekehade valmistamiseks kasutati Kunda tsemenditehases valmistatud portlandtsementi CEM I 42,5 N, klinkri sisaldusega 95-100% [57]. Tsemendi nimetuses olev tähtis N viitab sellele, et tsemendil on tavaline eeltugevusklass. Eeltugevuse klass N näitab, et peale betoonisegu kahe päevast kuivamist on keha survetugevus  $\geq 10$  MPa [52]. Tsement vastab standardile EVS EN 197-1:2011. Katseteks vajalikku tsementi ladustati kuivas keskkonnas.

Katsekehade valmistamiseks kasutati Kotton Betoon OÜ tehase poolt kasutatavat killustikku. Killustiku tootja on AS Kaltsiit ning killustik on kaevandatud Otisaare karjäärist, Põltsamaa vallast. Killustik vastab standardi EVS-EN 12620:2002+A1:2008 nõuetele ning materjal on sertifitseeritud Tallinna Tehnikaülikoolis. Killustikku iseloomustavad näitajad on saadud materjali toimivusdeklaratsioonilt ja esitatud tabelis 7 (Tabel 7).

**Tabel 7.** Katsetes kasutatud killustikku iseloomustavad näitajad (Lisa 1)

Omadus	Lubjakivi
Tihedus (Mg/m <sup>3</sup> )	2,60
Fraktsioon	8/16
Purunemiskindlus (LA)	30
Plastsustegur	FI <sub>15</sub>
Külmakindlus	F <sub>2</sub>
Peenosiste sisaldus	f <sub>4</sub>
Veeimavus	WA <sub>242</sub>

Vastavalt tabelis 7 esitatule, on näha, et lubjakivikillustiku minimaalne fraktsioon on suurusega 8 mm. Killustiku purunemiskindlus on toimivusdeklaratsioonis esitatud Los Angeles´e teguriga, mis on põhiliseks purunemiskindluse hindamise meetodiks. Materjali LA tegur on  $\leq 30$ . Killustiku külmakindlus vastab kategooriale F<sub>2</sub> ning seda killustikku tohiks kasutada ainult veega osaliselt või täielikult küllastunud keskkonnatingimustes. [44]

Katses kasutatud liiv on toodud Kalda karjäärist ning on toodetud OÜ Krüüdneri Karjäär poolt. Tootmises kasutatav liiv vastab standarditele EVS-EN 12620:2002+A1:2008, EVS-EN 13242:2002+A1:2007, EVS-EN 13043:2002 ja EVS-EN 13043:2002/AC:2004 ning on sobiv betooni täitematerjal. Kasutatud liiv on fraktsiooniga 0/4. Liiva ladustati kuivas keskkonnas.

Katsekehade valmistamiseks kasutatud klaas saadi Kotton Betoon OÜ-lt. Katsete läbiviimiseks valiti karastatud klaas. Karastatud klaasi valmistamiseks kuumutatakse klaas kuni sulamispunktini ning seejärel jahutatakse see kiirelt maha, muutes seeläbi klaasi struktuuri. Karastatud klaasil on oluliselt suurem kuumataluvus ning kuni viis korda suurem tugevus võrreldes tavaklaasiga. Klaasi struktuuri muutustest tingituna muutub ka karastatud

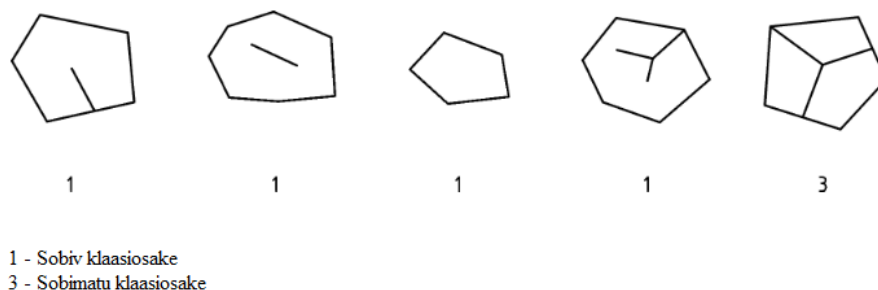
klaasi purunemispilt. Kui tavaklaas puruneb surve või löögi tagajärjel teravateks kildudeks, siis karastatud klaas puruneb väiksemateks, ühtlasema suurusega ümaramateks tükkideks, mille servad ei ole teravad. [58] Selle purunemiskiibi põhjuseks on läbi karastamise protsessi klaaspaneeli sisse kogunenud potentsiaalne energia (Joonis 7) [59].



**Joonis 7 .** Karastatud klaasi purunemispilt

Kui betoonis kasutatava tsemendi, liiva ja killustiku omadused ja kvaliteet on reguleeritud vastavalt erinevate standarditega, siis nõuded betoonis kasutatavale klaasile, selle omadustele või kvaliteedile ei kajastu standardites. Kasutades katsetes karastatud klaasi, on võimalik jälgida ainult seda, et karastatud klaas oleks valmistatud vastavalt EVS-EN 12150-1:2015 standardile, mis reguleerib termiliselt tugevdatud lubi-liiv-turvaklaasi omadusi ja kvaliteeti [60]. Vastavalt standardile tehakse toodetavale karastatud klaasi paneelile purunemistest, millega hinnatakse, kas klaaspaneeli purunemispilt vastab termiliselt karastatud klaasile ette nähtud purunemisele. Selleks võetakse karastatud klaaspaneel mõõtmetega 360 mm x 1100 mm ning paneeli pikema serva keskosast 13 mm kaugusel avaldatakse paneelile terava tööriistaga survet. Katsepiirkonnast arvatakse välja surve avaldamise kohast 100 mm raadiusesse jääv piirkond ning lisaks klaaspaneeli kõikidest servadest 25 mm laiune ala. Purunenud klaaspaneelilt valitakse kõige suuremate osakestega ala ning märgitakse nende ümbrusesse maha 50 mm x 50 mm suurune ala, milles teostatakse

purunenud osakeste loendus. Üheks osakeseks loetakse kõik killud, mille pinnal ei ole näha läbivaid pragusid (joonis 8). [60]



**Joonis 8.** Näited loendamiseks sobivatest ja mitesobivatest klaasiosakestest [60]

Viie minuti möödumisel surve avaldamisest klaasile loendatakse kokku valitud alale jäävad osakesed. Kõik killud, mis on tervenisti markeeritud alas, loetakse kui üks osake ning kõik osakesed, mis jäävad markeeritud alale osaliselt, loetakse kui  $\frac{1}{2}$  osakest. Vastavalt standardile loetakse klaas korrektselt karastatuks juhul, kui kokku loetud osakeste arv vastavalt klaaspaneeli paksusele ei ole väiksem, kui standardis esitatud miimumnõuded seda ette näevad (Tabel 8). [60]

**Tabel 8.** Karastatud klaasi purunemiskatse osakeste loendamise minimaalsed väärtused [60]

Klaasi liik	Nominaalne paksus, $d$ mm	Minimaalne osakeste arv tk
Kõik klaasitüübid	2	15
Kõik klaasitüübid	3	15
Kõik klaasitüübid	4 – 12	40
Kõik klaasitüübid	15 - 25	30

Käesoleva töö eesmärgiks oli taaskasutada jäätmeklaasi. Kuigi iga klaaspaneeli vastavust standardile ei kontrollitud, oli karastatud klaasi puhul võimalik jälgida et klaasiosakesed oleksid sarnase fraktsiooniga ning, et klaasi hulgas ei oleks lisandeid, mis võivad mõjutada betooni survetugevust.

Katsetes kasutatava mördi valmistamiseks kasutati harilikku kraanivett. Vastavalt standardile EVS-EN 1008:2002 ei tohi betoonisegus kasutatava vee kloriidide sisaldus ületada järgnevaid väärtusi [61]:

- Eelpingestatud betoon või süstmört – 500 mg/l
- Raudbetoon või sängitatud metalli sisaldav betoon – 1000 mg/l
- Sarrust või sängitatud metalli sisaldav betoon – 4500 mg/l



## 4. KATSED

### 4.1 Katsemetoodika

Käesolevas magistritöös määrati betoonist katsekehade survetugevust. Katsetustes kasutatavate katsekehade mõõtmete valikul lähtuti standardist EVS-EN 12390-1:2012, mille alusel olid katsekuubiku mõõtmed 150 x 150 x 150 mm [62]. Valitud mõõtmed vastavad ka standardis EVS-EN 12390-3:2009 esitatud nõuetele katsekeha mõõtmete osas survetugevuse katsetamisel [63]. Pärast katsekehade mõõtmete valimist valmistati lehtterasest katsekehade vormid. Betoonisegus kasutatavad täitematerjalid, tsement ja vesi vastasid Eesti standarditega kehtestatud nõuetele. Karastatud jäätmeklaasi leht purustati käsihaamriga. Sellisel viisil puruneb karastatud klaas ühtlasemalt ning sealjuures ei moodustu klaasipulbrit. Purustatud klaasi fraktsiooni ühtlust hinnati visuaalselt ning lisaks klaas sõeluti fraktsiooniga 4/12 (Joonis 9).



**Joonis 9.** Katsekehades kasutatud purustatud karastatud klaas

Betoonisegu valmistati tehases kasutatava segumikseriga Optimix M 150E (Joonis 10).



**Joonis 10.** Segumikser Optimix M150E

Joonisel 10 nähtavasse töötavasse segistisse valati ette kaalutud liiva, killustiku ja klaasi kogused ning segati seni, kuni täitematerjalid olid ühtlaselt läbi segunenud. Seejärel lisati tsement segati umbes kolm minutit. Pärast seda lisati vesi ning segati veel kaks minutit. Seejärel hinnati vastavalt standardile EVS-EN 12350-2:2009 betoonisegu vajumist. Tüvikoonus täideti kolme kihi kaupa betooniseguga, iga segukihti eraldi tihendades. Iga kihi paksus oli vähemalt 1/3 koonuse kõrgusest. Tihendamiseks kasutati tihendamisvarrast, millega sorgiti segu 25 korda iga kihi lisamise järel. Seejärel eemaldati ettevaatlikult tüvikoonus ning mõõdeti segu vajumi suurus, nagu on näidatud joonisel 11 (Joonis 11).



**Joonis 11.** Vajumikatse

Valmis segu kallati seguämbresse ning transporditi vormide juurde. Vormid õlitati ning betoonisegu valati vormidesse kolme erineva kihina (Joonis 12).



**Joonisel 12.** Vormidesse valatud betoonisegu

Betoonisegu tihendati sisevibraatoriga 10 sekundi jooksu. Vibreerides üritati vältida ülevibreerimist, mis võib põhjustada manustunud õhu kadu. Betoonisegu tihendati vastavalt standardis EVS-EN 12390-2:2009 esitatud nõuetele. Kuubikud jäeti 24 tunniks kivistuma. Seejärel eemaldati kehad vormidest ning markeeriti vastavalt betoonisegu koostisele Klaas 1, Klaas 2 või Klaas 3 ning tähistati numbritega. Seejärel asetati kehad veevanni kivistuma. Pärast 28 päeva möödumist võeti kehad veest välja ning transporditi Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboratoriumisse. Kokku valmistati 56 katsekeha. Katsekehad valmistati kahel erineval kuupäeval. Kehade valmistamise aeg, nende markeering ja kogus on esitatud tabelis 9 (Tabel 9).

**Tabel 9.** Katsekehade valamise andmed

Katsekeha märgistus	Kogus	Valamise kuupäev	Vette panemise kuupäev
Klaas 1	16	27.12.2018	28.12.2018
Klaas 2	18	27.02.2019	28.02.2019
Klaas 3	18	27.02.2019	28.02.2019
Klaas 1-90	4	27.12.2018	28.12.2018

Katsekehade hoidmine, tähistamine ja transport toimusid vastavalt standardis EVS-EN 12390-2:2009 esitatud nõuetele. [64]

## 4.2 Betoonisegude valmistamine survetugevuse katse jaoks

Käesoleva töö eesmärgiks oli selgitada, kas ja kui suures koguses on võimalik taaskasutada jäätmeklaasi betooni valmistamisel, asendades jämetäitematerjali. Kotton Betoon OÜ tootejuhi soov oli saada teada, kas jämetäitematerjali asendamine klaasiga võimaldab saavutada betooni survetugevust C30/37. Betoonisegu baasretseptiks oli Kotton Betoon OÜ tavapärane tootmisretsept, mida muudeti asendades jämetäitematerjali purustatud jäätmeklaasiga. Ühe kuupmeetri baasbetoonisegu valmistamiseks kasutati 300 kg tsementi CEM I 42,5 N, 750 kg liiva fraktsiooniga 0/4, 1200 kg lubjakivikillustiku fraktsiooniga 8/16 ning 150 liitrit vett. Vesi-tsementteguriks on 0,50. Kokku valmistati kolm erinevat betoonisegu. Esimeses betoonisegus (Klaas 1) lisati betooni tavaretseptile jämetäitematerjali

kogumassist 20% karastatud klaasi. Teises mõrdis (Klaas 2) asendati jämetäitematerjali karastatud klaasiga 40% ulatuses massist. Kolmandas betoonisegus (Klaas 3) asendati jämetäitematerjali karastatud klaasiga 60% ulatuses massist. Baasretsepti aluseks võttes arvutati vajaminev betooni kogus 20 katsekeha valmistamiseks (Tabel 10).

**Tabel 10.** Betoonisegude koostis 20 katsekeha valmistamiseks

<b>Materjal</b>	<b>Klaas 1</b>	<b>Klaas 2</b>	<b>Klaas 3</b>
<b>Tsement CEM I 42,5 N</b>	20 250 g	20 250 g	20 250 g
<b>Liiv 0/4</b>	50 630 g	50 630 g	50 630 g
<b>Lubjakivi 8/16</b>	81 000 g	48 600 g	32 400 g
<b>Karastatud klaas 4/12</b>	16 200 g	32 400 g	48 600 g
<b>Vesi</b>	10 120 g	10 120 g	10 120 g

Tabelist 10 on näha, et kõikide betoonisegude puhul ei muutu kordagi tsemendi, vee ja liiva kogused. Karastatud jäätmeklaasi asendamise osakaalude valikul tugineti kirjanduses toodud andmetele, kus on üldjuhul kasutatud tavalist pudeliklaasi ning täitematerjali asendamise osakaal on jäänud vahemikku 20-30%. Kuna käesolevas töös kasutatakse karastatud klaasi, mis on ligikaudu viis korda tugevam, kui tavaklaas, otsustati katsetada jämetäitematerjali asendamisega 40% ja 60% kogumassist.

### 4.3 Survekatse metoodika

Katsekehade survetugevuse määramine tehti Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboratooriumis. Katsekehade survetugevust hinnati purustaval meetodil. Katsekehad purustati universaalse katseseadmega P-125 ning kõik katsed viidi läbi vastavalt standardis EVS EN 12390-3:2009 kirjeldatule. Seejärel mõõdeti kõik katsekehad ning mõõtmistulemused kanti katseprotokolli. Katseprotokoll koostati arvutiprogrammis *MS Excel*. Kuna universaalse katseseadme P-125 mõõteskaala ühik on kN, tuleb survetugevuse arvutamiseks seadme mõõdiku tulemus teisendada megapaskaliteks (njuutoniteks ruutmillimeetri kohta). Selleks kasutatakse vastavalt standardile EVS EN 12390-3:2009 järgnevat valemit (4.1) [63]:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.1)$$

kus:

$f_c$  - survetugevus megapaskalites (N/mm<sup>2</sup>);

$F$  - suurim koormus njuutonites (N);

$A_c$  - katsekeha ristlõikepind, millele survejõud mõjub, esitatud ruutmillimeetrites (mm<sup>2</sup>).

Vastav teisendus lisati kiiruse huvides otse programmi *MS Excel*, mis võimaldas automaatselt välja arvutada vastavad survetugevuse väärtused megapaskalites. Enne katsekehade purustamist universaalse katsemasinaga P-125 veenduti, et seadme koormuspinnad oleksid puhtad ning katsekeha küljes ei ole puru või muid jääke, mis võiksid mõjutada katsetulemusi. Katsekeha asetati seejärel koormuspinna keskele. Koormamisel valitakse ühtlane koormamiskiirus ning koormust suurendatakse ühtlaselt kuni katsekeha purunemiseni. Seejärel registreeritakse maksimaalne näit seadme mõõdikutelt ning kantakse saadud andmed protokollis.

Katsetuste põhjal saadud survetugevuse väärtuseid võrreldi vastavalt standardis EVS-EN 206:2014+A1:2016 esitatud normväärtustega betooni tugevusklassi määramiseks (Tabel 11).

**Tabel 11.** Normaali- ja raskebetooni survetugevusklassid kuubiliste katsekehade korral [65]

Survetugevusklass	Kuubiliste katsekehade minimaalne normsurvetugevus $F_{ck,cube}$ N/mm <sup>2</sup>
C8/10	10
C12/15	15
C16/20	20
C20/25	25
C25/30	30
C30/37	37
C35/45	45
C40/50	50

Lisaks tabelis 11 nähtavatele survetugevusklassidele on veel ka kõrgemaid klasse, kuid mis on vähe kasutusel. Katsetega kontrolliti, millisele standardis esitatud tugevusklassile vastab



valmistatud betoon peale 28-päevast kivistumist ning pärast 90 päevast kivistumist. Selleks, et kontrollida täitematerjalide ühtlast jaotumist kuubikus, lõigati üks katsekehade pooleks (Joonis 13).



**Joonis 13.** Vaade poolitatud katsekehale.

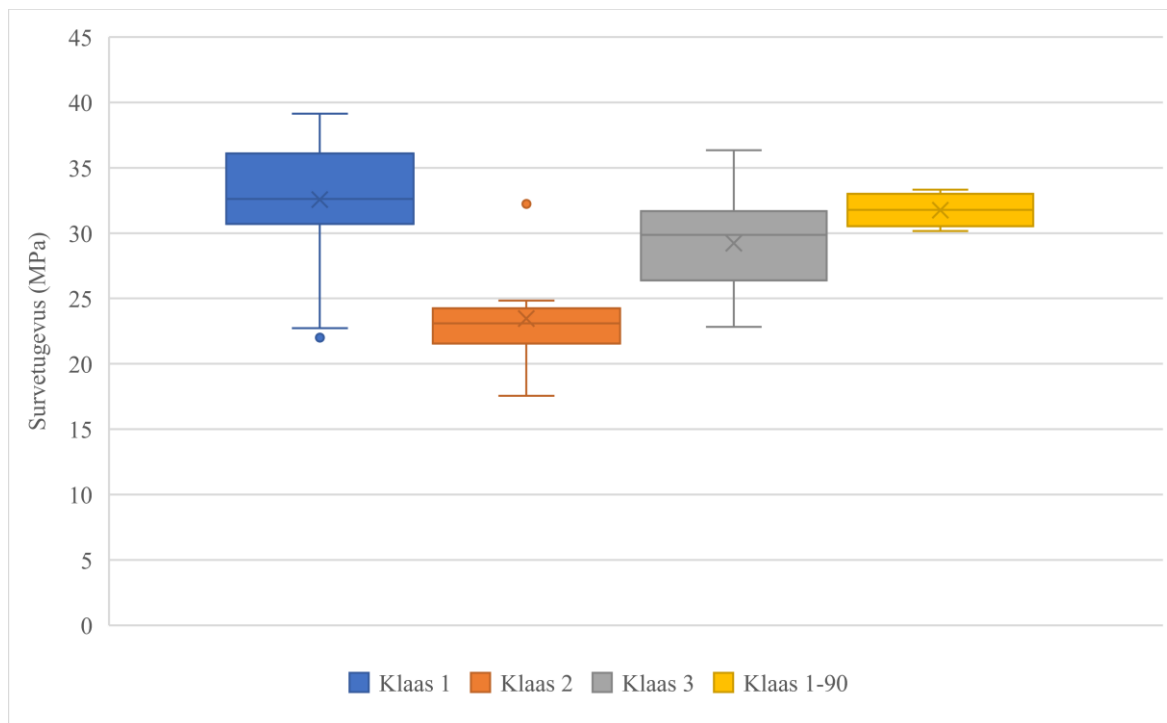
Jooniselt 13 näeme katsekeha lõiget, kus täitematerjal on ühtlaselt jaotunud.

## **4.4 Katsetulemuste analüüs**

### **4.4.1 Survetugevus**

Käesolevas töös määrati jäätmeklaasi kasutamise mõju jämetäitematerjalis betooni survetugevusele. Survetugevuse keskmised väärtused peale 28 päevast kivistumist iga

betoonisegu kohta on esitatud joonisel 14 (Joonis 14). Tulemused katsekehade kohta on esitatud lisas 2.

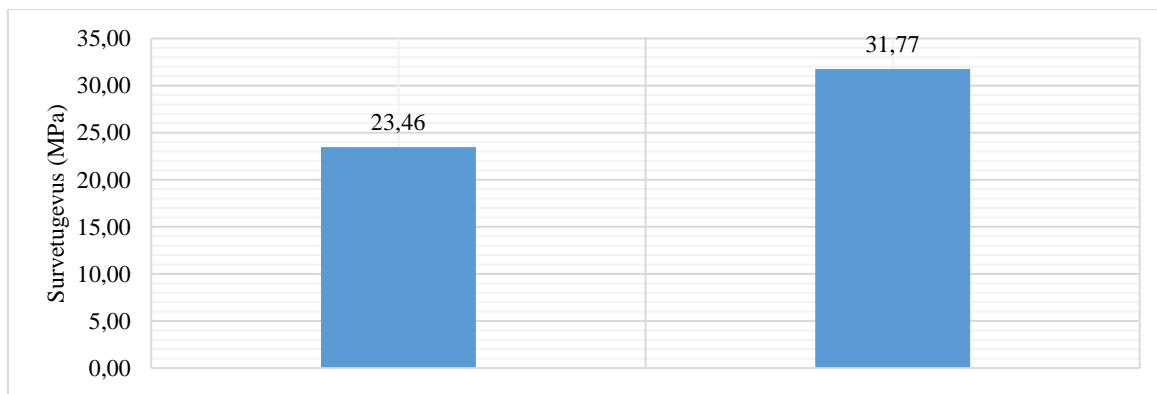


**Joonis 14.** Erinevate klaasisisaldusega katsekehade keskmised survetugevused peale 28 päevast ja 90 päevast kivinemist

Katsetulemused näitasid, et mitte ükski valmistatud betoonisegudest ei saavutanud keskmiseks survetugevuseks tehase poolt püstitatud eesmärki, milleks oli 37 MPa. See tähendab seda, et ettevõtte tootmise seisukohalt ei ole saadud katsetulemuste põhjal võimalik tooteid kasutada kandvates konstruktsioonides. Kõige suurema survetugevuse saavutas betoonisegul Klaas 2, kus karastatud jäätmeklaasiga asendati jämetäitematerjali 40% ulatuses kogumassist. Selles katseseerias purustati kokku 18 katsekeha ning survetugevused jäid vahemikku 22,00 – 39,15 MPa. Katsekehade keskmine survetugevus oli 32,57 MPa ning survetugevuseklass C25/30. Katsekehade keskmine survetugevus oli soovitud survetugevusest 37 MPa-st 12% kehvem. Erinevus kõige suurema ja kõige väiksema tulemuse vahel oli 17,15 MPa, mis on väga suur vahe (Joonis 14). Üheks survetugevuse väärtuste kõikumise põhjuseks võib olla näiteks betoonisegu ebapiisav tihendamine. Kui eemaldada tulemuste hulgast kaks kõige suuremat ja kaks kõige väiksemat tulemust, siis keskmine survetugevus tõuseb 33,11 MPa-ni. Segust Klaas-2 valmistatud katsekehade



survetugevus oligi parim – 12 katsekuubikut 18-st saavutasid survetugevuse, mis jäi vahemikku 30 - 37 MPa. Ülejäänud kuuest katsekehast neli saavutasid survetugevuse, mis jäi vahemikku 20 - 30 MPa ning kaks katsekeha saavutasid survetugevuse, mis ületas 37 MPa. Katsetulemused annavad aimu sellest, et kuigi saavutatud survetugevus ei võimalda segu kasutada näiteks kandekonstruksioonide valmistamiseks, on tegemist siiski väga arvestatava tugevusklassiga betooniga, mis võib tootearenduse seisukohalt leida kindlasti rakendust. Samuti on võimalik katsetatud betoonisegu kasutada ettevõtte põhitoote, ehk fitplokide, valmistamiseks eeldusel, et neid plokke ei kasutata kandekonstruksioonides ning nende kasutamiseks seatakse projektiga teatavad nõuded ja tingimused. Kõige madalam survetugevus oli betoonisegust Klaas-1, kus jämetäitematerjali kogumassist lisati betoonisegule 20% ulatuses jäätmeklaasi. Sellest betoonisegust valmistatud katsekehade survetugevused jäid vahemikku 17,54 MPa – 32,23 MPa ning keskmine survetugevus oli 23,46 MPa. Võrreldes Klaas-1 betoonisegu betooniseguga Klaas-2, millest valmistatud katsekehad saavutasid 28 päeva jooksul survetugevuse 32,57 MPa, on näha, et katsekehade Klaas-1 survetugevusnäitajad võrdse kivistumisaja korral on 27,9% halvemad. Võrreldes soovitud survetugevusega 37 MPa, on Klaas-1 katsekehade keskmine survetugevus 36,5% nõrgem. Selle põhjuseks on ilmselt asjaolu, et betoonisegus oli jämetäitematerjali osakaal liiga suur (tavaline mass jämetäitematerjali + 20% klaasi). Kuigi karastatud klaas on tugev materjal, näitas antud katse, et ilma lubjakivikillustiku kogust vähendamata jäätmeklaasi betoonisegusse lisada ei ole otstarbekas. Küll aga paranes Klaas-1 survetugevus aja möödudes. Neli katsekeha, mis jäeti kivistuma 90-ks päevaks, saavutasid keskmise survetugevuse 31,77 MPa, ning võrreldes 28 päeva vanuste katsekuubikutega toimus survetugevuse tõus 26,15% (Joonis 15).



**Joonis 15.** Katsekehade keskmine survetugevuse võrdlus peale 28 päevast kivistumist ja peale 90 päevast kivistumist seguga Klaas-1

90 päeva möödudes saavutatud survetugevus on ainult 0,8 MPa võrra väiksem kõige suurema keskmise survetugevusega betoonisegu Klaas-2 keskmisest survetugevusest.

On loomulik, et ka klaasilisanditega betooni survetugevus aja möödudes suureneb. Ka kirjandust uurides ilmneb, et katsekehad, mis on 90-ks päevaks kivinema jäetud, on suurema survetugevusega, kui kehad, mida on hoitud 28 päeva. Tähelepanuväärne on see, et Klaas-1 segust katsekehade survetugevus suurenes pikema kivinemise tõttu isegi 26,15%, mis on kirjandusallikates toodud väärtustest märksa rohkem. Kirjandusallikate andmetel suureneb üldjuhul survetugevus 90 päeva vanustel katsekehadel võrreldes 28 päeva vanuste katsekehadega ligikaudu 10%. Siit on võimalik järeldada, et selle betoonisegu kasutamine on mõeldav toodetes, mida saab pärast valmistamist tehases ladustada ning neid ei kasutata enne 90 päeva möödumist. Kuna tootmisettevõtetes on laopind reeglina väga väärtuslik, siis on kahtlane, kas toodete ladustamine, mida ei ole võimalik müüa või kasutada kolme kuu jooksul alates valmistamisest, on mõistlik lahendus. Sellise toote valmistamine oleks mõeldav juhul, kui on selge, et näiteks talvine müügimaht on tunduvalt väiksem kui suvine. See võimaldaks betoonisegu kasutada talvel, valmistades lattu toodangut suviseks müügiperioodiks.

Katsekehad, mis valmistati betooniseguga Klaas-3, kus jämetäitematerjali asendati selle kogumassist 60% ulatuses karastatud jäätmeklaasiga, saavutasid pärast 28 päevast kivinemist survetugevuse 22,82 - 36,33 MPa. 18 katsekeha keskmine survetugevus oli 29,24 MPa. Kui võrrelda seda kahe eelmise betoonisegu survetugevusega, siis Klaas-3 segust valmistatud katsekehad olid nõrgemad, kui Klaas-2 segust valmistatud kehad, kuid tugevamad kui segust Klaas-1 valmistatud katsekehad. Klaas-3 betoonisegust katsekehad olid keskmiselt 5,78 MPa, ehk 19,76% tugevamad, kui seguga Klaas-1 valmistatud katsekehad. Samas olid Klaas-3 seguga kehad keskmiselt 3,33 MPa, ehk 10,22% nõrgamad kui seguga Klaas-2 valmistatud kehad. Kirjandusele viidates peaks täitematerjali massi asendamine klaasiga nii suures ulatuses mõjutama survetugevust märksa rohkem, seega oli nii kõrge survetugevuse väärtus ootamatu. Samuti oli ootamatu, et võrreldes seguga Klaas-2, oli survetugevus segul Klaas-3 ainult 10,22% kehvem. Oodatust kõrgema survetugevuse taga võib peituda asjaolu, et kui kirjanduses on reeglina kasutatud täitematerjali asendamiseks purustatud pudeliklaasi või olmeklaasi, siis karastatud klaas on oma valmistamise viisist tingituna tugevam ja seda kasutataksegi toodetes, kus peab olema tagatud klaasi purunemiskindlus. Lisaks mängib rolli ka see, et karastatud klaasi

purunemispilt on võrreldes tavaklaasiga erinev, olles purunenuna väikeste mitteteravate äärtega kuubikutena. Lisaks on katsetes kasutatud karastatud klaas fraktsiooniga 4/12 ning kasutatud lubjakivikillustik fraktsiooniga 8/16, mille tulemusena täidab kuubikukujuline karastatud klaas, mis on väiksema fraktsiooniga kui 8 mm, paremini betooni struktuuris esinevaid tühimikke, mida liiv ei suuda täielikult täita. See tagab aga betoonile suurema survetugevuse.

Varasemates uuringutes käesoleva teema kohta on järeldatud, et täitematerjalide asendamine jäätmeklaasiga keskmiselt 20-30% on jätkusuutlik ning tagab betoonile hea survetugevuse. Kui käesolevas töös asendati jämetäitematerjali 40 – 60% ulatuses klaasiga, mis andis keskmised survetugevused 32,57 MPa ja 29,24 MPa, siis võrreldes survetugevuse muutumise kiirust protsentide muutusega, võib saada aimu ka sellest, milline oleks olnud betooni survetugevus kirjanduses soovitatud 20% juures. Nagu varasemalt selgus, siis 60% asendusprotsendiga katsekehade keskmine survetugevus vähenes 10,22%. Eeldusel, et mida suurem on klaasi hulk betoonisegus, seda kehvem on survetugevus, saab järeldada, et 20% asendusprotsendiga betoonisegu survetugevus võiks eeldatavalt olla 35,8 MPa. Suure tõenäosusega ei lange betooni survetugevus protsendist lähtuvalt päris võrdeliselt, ning reaalne survetugevus võib olla veidi suurem või veidi väiksem. See aga tähendaks napilt alla 37 MPa piiri jäämist. Kuna betoonisegudele lisatakse reeglina ka erinevaid keemilisi lisandeid, mida käesolevas töös ei kasutatud, on võimalik, et sobivate lisandite kasutamine betoonis võib aidata kaasa soovitud survetugevuse saavutamisele. Seejuures kinnitavad vähemalt teoreetiliselt käesolevad katsed ka varasemaid uurimusi, mis on andnud optimaalseks asendusprotsendiks 20-30% täitematerjali massist. Erinevus on vaid selles, et kui kirjanduses on reeglina asendatud peentäitematerjali, siis käesolevas töös asendati jämetäitematerjali. Võimaliku peen- ja jämetäitematerjali koos asendamise võimalusi tuleb täiendavalt uurida tulevikus.

Kõikide katsetatud katsekehade purunemispildid vastasid standardis aksepteeritavatele purunemispiltidele. Katsetuste käigus ei täheldatud ühelgi katsekehal plahvatuslikku purunemist ning samuti ei täheldatud ühtegi tõmbeprao tekkimist, mis oleks näidanud katsekehade mitterahuldavat purunemispilti. Näiteid katsekehade purunemisest on näha jooniselt 16a, 16b (Joonis 16).



**Joonis 16.** Näiteid katsekehade purunemispiltide kohta.

Andmed katsekehade survetugevuse muutuste kohta on esitatud tabelis 12.

**Tabel 12.** Andmed katsekehade survetugevuse muutuste kohta

	Survetugevus; MPa			
	Klaas-1	Klaas-2	Klaas-3	Klaas 1-90
<b>Min</b>	17,54	22,00	22,82	30,17
<b>Max</b>	32,23	39,15	36,33	33,33
<b>Keskmine</b>	23,46	32,57	29,24	31,77
<b>Standardhälve</b>	3,78	4,65	3,85	1,13

Tabelist 12 näeme andmeid erinevate betoonisegudega valmistatud katsekehade survetugevuse muutuste kohta. Minimaalne survetugevus peale 28 päevast kivistumist on kõige väiksem seguga Klaas-1 valmistatud katsekehadel ning kõige suurem seguga Klaas 3 valmistatud katsekehadel. Maksimaalne survetugevus on kõige suurem aga katsekehadel, milles jämetäitematerjali on klaasiga asendatud 40% ulatuses. Standardhälbed Klaas-1 ja Klaas-3 seguga valmistatud katsekehadel on sarnased, vastavalt 3,78 ja 3,85. Suurim standardhälve on seguga Klaas-2 valmistatud katsekehade survetugevuste puhul, vastavalt 4,65.

Määrati tulemuste 95%-line usaldusintervall normaaljaotuse baasil. Võttes aluseks keskmise survetugevuse ning standardhälbe arvutati välja alumine- ja ülemine usalduspiir. Leitud usalduspiirid on näha tabelist 13 (Tabel 13).

**Tabel 13.** 95%-line usaldusintervall normaaljaotuse baasil

	<b>Klaas-1</b>	<b>Klaas-2</b>	<b>Klaas-3</b>	<b>Klaas 1-90</b>
<b>Alumine usalduspiir</b>	21,71	30,29	27,46	30,66
<b>Ülemine usalduspiir</b>	25,21	34,85	31,02	32,88

Leitud usalduspiir näitab, et 95%-lise tõenäosusega jääb betooniseguga Klaas-1 valmistatud katsekehade survetugevus vahemikku 21,71 MPa – 25,21 MPa. Betooniseguga Klaas-2 valmistatud katsekehade survetugevus jääb aga 95%-lise tõenäosusega vahemikku 30,29 – 34,85 MPa. Klaas-3 katsekehade tõenäoline survetugevus jääb vahemikku 27,46 MPa – 31,02 MPa.

Käesolevate katsete põhjal ei olnud võimalik hinnata räni-leelise reaktsiooni toimumise võimalikkust, kuid lähtudes varasemast kirjandusest, on oht selle tekkeks suur. Uuringud on näidanud, et mida suuremates osakaaludes asendatakse täitematerjale klaasiga ning mida suurem on klaasi fraktsioon, seda suurem on ka oht reaktsiooni tekkimisele. Räni-leelise reaktsiooni toimumist karastatud jäätmeklaasi kasutamisel ning selle mõju betoonile on võimalik tulevikus edasi uurida. Samuti vajab karastatud jäätmeklaasi kasutamine betooni koostises täiendavat uurimist külmakindluse seisukohast. Klaas on materjal, mis ei ima vett ning loodusliku vett imava jämetäitematerjali koguse liiga suurel vähendamisel võib betooni väliskeskkonnas hoidmisel tekkida olukord, kus betooni sisse jääb liigne vesi, mis külmumistsüklite jooksul avaldab betoonkonstruktsioonile negatiivset mõju. Samuti vajab täiendavat uurimist jäätmeklaasi sisaldava betooni vastupidavus erinevatele kemikaalidele.

#### **4.4.2 Tasuvusanalüüs**

Jäätmeklaasi kasutamine betooni täitematerjali asendajana ei paku mitte ainult võimalust vähendada klaasijäätmete ladestamist prügilatesse ja seeläbi parandada keskkonna üldise olukorra parandamist, vaid selle kasutamine võib olla ka majanduslikult tasuv. Jäätmekäitlusettevõtted küsivad vastuvõetavate jäätmete eest raha, ning võimalus kasutada jäätmeklaasi betooni koostises võib anda ettevõttele märkimisväärse majandusliku eelise. Võttes aluseks Kotton Betoon OÜ tootmise ning nende tootmisprotsessis kasutatavate materjalide hinnad, on võimalik välja arvutada tõenäolised muutused toote omahinnas pärast

jäätmeklaasi kasutuselevõttu. Tabelis 12 võrreldakse kõikide katseteks kasutatud betoonisegude ühe kuupmeetri maksumust. Segu nr 1 on Kotton Betoon OÜ tehases hetkel kasutuses olev tavaretsept. Segud 2 kuni 4 on nimetatud vastavalt Klaas-1, Klaas-2 ja Klaas-3 (Tabel 14).

**Tabel 14.** Ühe kuupmeetri betoonisegu valmistamise maksumus.

Komponent	Materjali ostuhind 1 kg kohta koos transpordiga tehasesse [EUR]	Kogus retseptides 1 m <sup>3</sup> betoonisegu kohta [kg]				Hind [EUR]			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Liiv 0/8	0,0072	750	750	750	750	5,4	5,4	5,4	5,4
Lubjakivi-killustik 8/16	0,0130	1200	1200	720	480	15,6	15,6	9,36	6,24
Jäätmeklaas	-0,0500	0	240	480	720	0,00	-12,0	-24,0	-36,0
CEM I 42,5 N	0,0900	300	300	300	300	27,0	27,0	27,0	27,0
Vesi	0,0012	150	150	150	150	0,18	0,18	0,18	0,18
<b>Kokku: EUR/m<sup>3</sup></b>						49,18	36,18	17,94	2,82

Tabelist on näha, et jäätmeklaasi koguste suurendamine betoonisegus vähendab drastiliselt betoonisegu omahinda. Seejuures jäetakse hetkel arvestamata töötajate palgad, tootmishoone ülalpidamiskulud, tööriistade ja seadmete hoolduskulud. Vaadeldes kõigest toorainete ostuhindasid ning võrreldes erinevaid betoonisegusid on näha, et kui kasutada jäätmeklaasi betoonis 60% ulatuses jämetäitematerjali kogumassist, kahaneb betoonisegu omahind 2,82 €/m<sup>3</sup> peale. Hetkel on tootmises kasutatava betoonisegu kuupmeetri hind 49,18 €, seega lubjakivikillustiku asendamine 60% ulatuses selle kogumassist toob betoonisegu valmistamisel hinnavõidu 46,36 €/m<sup>3</sup>. Kui jäätmeklaasi osakaal betoonis oleks näiteks 63,75% ning lubjakivikillustiku osakaal väheneks 36,25%, oleks betoonisegu valmistamise materjalide omahind 0€. Jäätmeklaasi vastuvõtjale makstav hind kataks kõigi ülejäänud betoonisegu komponentide maksumuse ning valmistatava toote hinna määraksid töö ja tootmiskulud. Kui asendada jämetäitematerjal karastatud jäätmeklaasiga 40% ulatuses jämetäitematerjali kogumassist, siis saab betoonisegu kuupmeetri omahinnaks 17,94 €. Ka see on arvestatav kokkuhoid võrreldes praeguse segu omahinnaga. Hinna vähenemine oleks 31,24 €/m<sup>3</sup>. Siinjuures tasub silmas pida, et killustiku asendamine 40% ulatuses andis katsekehade kõige paremad survetugevuse näitajad ning võiks seejuures olla ka käesoleva

töö kontekstis kõige optimaalsem lahendus. Betoonisegu, kus jämetäitematerjali ei asendatud, kuid lisati 20% ulatuses killustiku kogumassist karastatud jäätmeklaasi, omahind langeks küll 26% võrra, aga sellest betoonist katsekehade survetugevus oli samuti märgatavalt väiksem. Arvestades betooni kasutamise avaraid võimalusi, see ei pea kasutuses olema ilmtingimata konstruktiivse eesmärgiga. Ka nõrgema survetugevusega betooni on võimalik väga edukalt kasutada.

Kui võtta Kotton Betoon OÜ poolt hetkel pakutavatest toodetest kõige suurem võimalik fitplokk, mõõtmetega 2400 x 600 x 600 mm, siis selgub, et ühe betoonist ploki valmistamiseks kulub ettevõttel 0,86 m<sup>3</sup> betooni (Joonis 17).



**Joonis 17.** Kotton Betoon OÜ poolt toodetav fitplokk

Asendades plokis jämetäitematerjali 40% ulatuses klaasiga, saadakse ploki pealt hinnavõiduks kuni 60%. Seejuures tuleb meeles pidada, et kui oletatavalt müüb ettevõtte ühe aastaga 1000 ploki, siis selle käigus on leidnud oma tee taaskasutusse 412,8 tonni klaasjäätmeid. Samade parameetrite korral, aga asendades lubjakivikillustiku 60% ulatuses jäätmeklaasiga, oleks aastane taaskasutatud klaasi kogus juba 619,2 tonni. Keskkonnakaitse ja prügimajandamise seisukohalt on tegemist väga suurte numbriga. Kui seda tehnoloogiat mitte kasutada, siis on oht, et suurem osa sellest jäätmemassist leiab lõpuks oma tee hoopis prügilasse ladestamisele ning tehnoloogia võimalikku kasu ettevõttele majanduslikust seisukohast, on tegemist kõigile kasumliku tehnoloogiaga.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli purustatud jäätmeklaasi kasutamine betooni jämetäitematerjali asendajana ning betooni survetugevuse hindamine. Töö käigus anti ülevaade betooni ja klaasi valmistamise ning kasutamise ajaloost Eestis ja mujal maailmas. Lisaks anti töö käigus statistiline ülevaade klaasjäätmete tekkest Eestis aastatel 2004 – 2017. Magistritöös anti ülevaade varasematest katsetest ja uurimustest, milles on kasutatud jäätmeklaasi betooni komponendina. Kirjandusanalüüsi käigus selgus, et jäätmeklaasi on varasemalt kasutatud betooni valmistamiseks mitmel erineval kujul. Seda on kasutatud jahvatatuna tsemendi asendajana, peentäitematerjalide asendajana ning jämetäitematerjalide asendajana. Varasemad katsed on näidanud, et jäätmeklaasi kasutamine asendusmaterjalina betooni koostises 20% - 30% ulatuses kogumassist, tagab betooni eeldatava survetugevuse ning on sobiv täitematerjalide asendaja. Seejuures märkisid mõned uurimused, et klaasi jäätmeklaasi kasutamine betoonis võib parandada ka betooni vastupidavust sulfaatide ja kloriidide vastu ning võiks rakendust leida tuumajaamade kaitserajatiste konstruktsioonides. Teoreetilises osas käsitleti veel räni-leelise reaktsiooni võimalikku esinemist jäätmeklaasi kasutamisel. Kuna klaasi koostises esinev ränidioksiid reageerib tsemendis esinevate leelistega, on oht, et reaktsiooni tulemusel tekib betooni geelilaadne aine, mis liigse niiskuse korral paisub ja tekitab betoonis kahjustusi. Seejuures tuleb silmas pidada seda, et räni-leelise reaktsiooni tekkeaga on keeruline määrata ning see võib esineda ka aastakümnete pärast. Töös anti ülevaade räni-leelise reaktsiooni olemusest, selle nähtuse uurimise ajaloost ning toodi välja näiteid varasematest uurimustest.

Magistritöö katselises osas võrreldi omavahel kolme erineva betooniseguga valmistatud katsekehade survetugevusi. Katsekehade valmistamiseks kasutati Kotton Betooni OÜ tehases kasutatavaid tavapäraseid materjale ja betoonisegud valmistati vastavalt nendepoolsetele soovitudele. Kuna ettevõtte soov oli uuritavat tehnoloogiat kasutada tulevikus oma tootearenduses, võimaldati katsete läbiviimiseks oma tootmisruume ja ressursse. Katsetes kasutatud jäätmeklaasina kasutati karastatud klaasi, mis on võrreldes olmejäätmetest leiduva



klaasiga kuni viis korda tugevam. Samuti oli karastatud klaasi kasutamise eeliseks selle purustamise lihtsus ning purustatud klaasi ühtlane fraktsioon. Betoonisegud valmistati vastavalt tehases kasutatavale standardretseptile, mille juures oli eeldatavaks betooni tugevusklassiks C30/37. Katsetes kasutatav lubjakivikillustik pärines Otisaare karjäärist ja liiv Kalda karjäärist. Jäätmeklaasiga asendati jämetäitematerjali. Asendamise vahekorrad olid 40% jämetäitematerjali kogumassist ning 60% jämetäitematerjalide kogumassist. Lisaks valmistati segu, kuhu lisati 20% karastatud klaasi ilma killustikku vähendamata. Kokku valmistati 56 katsekeha. Kehad kivinesid 28 päeva ja 90 päeva. Seejärel transporditi katsekehad Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboratooriumisse, kus fikseeriti kuubikute mõõdud ning määrati nende survetugevus. Varasemalt valmistatud proovikatsekeha lõigati ka pooleks, et kontrollida täitematerjalide ühtlast jaotumist.

Survetugevuse katsetega uuriti, milline on erinevate asendusprotsentidega valmistatud betoonkuubikute survetugevus. Katsetulemused näitasid, et kõige paremaid survetugevuse näitajaid andsid katsekehad, kus betoonisegus oli jämetäitematerjali massist 40% asendatud karastatud jäätmeklaasiga. Seejuures oli katsekehade keskmine survetugevus 32,57 MPa. Klaasi osakaalu suurendamisel 60%-ni jämetäitematerjalide massist, vähenes betooni keskmine survetugevus 3,33 MPa, saavutades tulemuse 29,24 MPa. Kõige halvem survetugevus oli katsekehadel, kuhu lisati 20% jäätmeklaasi. Sellisel viisil valmistatud betooni keskmine survetugevus oli 23,46 MPa. Katsetulemustest selgus, et kuigi jäätmeklaasi kasutamine betoonis tagab arvestatava survetugevuse, ei võimalda see tehnoloogia valmistada betooni, mida saaks kasutada ka kandekonstruktsioonides. Seejuures kinnitati ka püstitatud hüpotees, mille kohaselt jäätmeklaasist valmistatud betoon ei taga betoonile piisavat survetugevust kandekonstruktsioonides kasutamiseks. Katsetulemusi võrreldi ka varasemate uuringutega ning leiti, et karastatud klaasi kasutamine võimaldab suurendada asendatud materjali kogust. Selle eeldatavaks põhjuseks on karastatud klaasi suurem tugevus võrreldes tavaklaasiga. Kotton Betoon OÜ tootearenduse seisukohalt on tegemist aga lootustandvate tulemustega, kuna nende praegune toodang ei ole mõeldud kasutamiseks kandvate elementidena. Töös läbi viidud tasuvusanalüüs näitas, et jäätmeklaasi kasutamine betoonis võib vähendada betoonisegu valmistamise maksumust kuni 94%, mis ettevõtte seisukohalt on oluline võit.

Täiendavalt tuleks uurida jäätmeklaasiga valmistatud betooni külmakindlust ning ränileelise reaktsiooni tekkimist betoonis.

## KASUTATUD KIRJANDUS

[1] EVS-EN-206:2014+A1:2016. (2016). Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus. Tallinn: Standardikeskus.

[2] **Pepin, R.** (2017). The History of Concrete. – Giatec. [veebileht] <https://www.giatecscientific.com/education/the-history-of-concrete/> (16.02.2019)

[3] The History of Concrete. (2017). – Merlo Construction. [veebileht] <https://www.merloconstructionmi.com/the-history-of-concrete/> (16.02.2019)

[4] The History of Concrete. *s.a.* – The Concrete Protector. [veebileht] <https://theconcreteprotector.com/history-of-concrete/> (22.03.2019)

[5] **Gromicko, N., Shepard, K.** *s.a.* The History of Concrete. – International Association of Certified Home Inspectors. [veebileht] - <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm/> (20.03.2019)

[6] **Wayman, E.** (2011). The Secrets of Ancient Rome's Buildings. – Smithsonian. [veebileht] <https://www.smithsonianmag.com/history/the-secrets-of-ancient-romes-buildings-234992/> (22.03.2019)

[7] Concrete. (2019). - Encyclopædia Britannica, inc. [veebileht] <https://www.britannica.com/technology/concrete-building-material/> (16.02.2019)

[8] **Coll. F.** (2016). The Construction of The Panama Canal. – Chimu. [veebileht] <https://www.chimuadventures.com/blog/2016/10/panama-canal-building/> (11.04.2019)

[9] Betooni ajalugu. *s.a.* – Rudus AS. [veebileht] <https://rudus.ee/betoon/betooni-ajalugu/> (07.05.2019)

[10] **Trumm, U., Kangur, P., Mändel, M.** (2014). Eesti Betoonehituse Ajalugu. Tallinn : In Nomine. 352 lk.

[11] **Lige, C.D.** *s.a.* Lennusadam. – KOKO arhitektid. [veebileht] <http://koko.ee/et/project/121-seaplane-harbour> (07.05.2019)

[12] Ajalugu. *s.a.* – Tallinna Teletorn. [veebileht] <https://www.teletorn.ee/meist/ajalugu/> (07.05.2019)

- [13] Three Gorges Dam. (2019). Encyclopædia Britannica, inc. [veebileht] <https://www.britannica.com/topic/Three-Gorges-Dam/> (09.05.2019)
- [14] **Shaw, M.** *s.a.* How Much Does Your Concrete Structure Weigh?. – Architizer. [veebileht] <https://architizer.com/blog/inspiration/collections/how-much-does-your-concrete-structure-weigh/> (09.05.2019)
- [15] Facts & Figures. *s.a.* – Burj Khalifa. [veebileht] <https://www.burjkhalifa.ae/en/the-tower/facts-figures/> (28.04.2019)
- [16] Building a Global Icon. *s.a.* – Burj Khalifa. [veebileht] <https://www.burjkhalifa.ae/en/the-tower/design-construction/> (28.04.2019)
- [17] Vasco da Gama Bridge. *s.a.* – Vinci Construction. [veebileht] <https://www.vinci-construction-projets.com/en/realisations/vasco-da-gama-bridge/> (09.05.2019)
- [18] Facts and History of Millau Bridge. *s.a.* – BridgesDB. [veebileht] <http://www.bridgesdb.com/bridge-list/millau-viaduct-bridge/> (07.05.2019)
- [19] Facts and History of Great Belt Bridge. *s.a.* – BridgesDB. [veebileht] <http://www.bridgesdb.com/bridge-list/great-belt-bridge/> (07.05.2019)
- [20] History of Glass. *s.a.* – History of Glass. [veebileht] <http://www.historyofglass.com/> (18.03.2019)
- [21] Wadi El Natrun. *s.a.* – Wikipedia. [veebileht] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wadi\\_El\\_Natrun](https://en.wikipedia.org/wiki/Wadi_El_Natrun) (18.03.2019)
- [22] Ancient Roman glass. *s.a.* – Romae Vitam. [veebileht] <https://www.romae-vitam.com/ancient-roman-glass.html> (18.03.2019)
- [23] Glass of The Romans. (2011). – Corning Museum of Glass. [veebileht] <https://www.cmog.org/article/glass-romans> (18.03.2019)
- [24] About Medieval Glass. (2011). – Corning Museum of Glass. [veebileht] <https://www.cmog.org/article/about-medieval-glass> (18.03.2019)
- [25] Glass of The Middle Ages 5th to 15th Century. (2018). – Ancient Glass. [veebileht] <https://ancientglass.wordpress.com/2018/10/01/glass-of-the-middle-ages-5th-to-14th-century/> (28.04.2019)
- [26] History of Murano Glass. *s.a.* – Glass of Venice. [veebileht] <https://ancientglass.wordpress.com/2018/10/01/glass-of-the-middle-ages-5th-to-14th-century/> (18.03.2019)

- [27] Float Glass Production Process. (2016). – Glass Academy. [veebileht] <https://ancientglass.wordpress.com/2018/10/01/glass-of-the-middle-ages-5th-to-14th-century/> (18.03.2019)
- [28] Our History. *s.a.* – Glasstone. [veebileht] <https://www.glasstone.com/pages/about-us> (08.05.2019)
- [29] **Tvauri, A.** (2012). Archaeological Investigations on The Sites of The Glassworks of Central Estonia, Archaeological Fieldwork in Estonia 2012. Tartu. 259-270 lk.
- [30] **Karma, O.** (1963). Tööstuslikult revolutsioonilt sotsialistlikule revolutsioonile Eestis, tööstuse arenemine 1917. aastani. Eesti NSV Teaduste Akadeemia ajaloo instituut. Tallinn. 381 lk.
- [31] Rõika-Meleski peeglivabrik. Foto teinud 1857. aastal W. S. Stavenhagen. – Rahvusrhiivi Fotoinfosüsteem. EAA.5238.1.738.109.2.
- [32] Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu. (vastu võetud 14.12.2015, viimati jõustunud 01.01.2016). *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/118122015014> (03.03.2019)
- [33] Jäätmete taaskasutamise- ja kõrvaldamistoimingute nimistud. (RT I, 21.06.2016, 36). [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/114122011004?leiaKehtiv> (02.06.2019)
- [34] Jäätmearuandluse infosüsteem JATS. [e-andmebaas] <https://jats.keskkonnainfo.ee/main.php?public=1> (03.05.2019)
- [35] Ülevaade Eesti Pandipakend OÜ tegevusest 2017. aastal. (2018). Tallinn: Eesti Pandipakend. <https://eestipandipakend.ee/wp-content/uploads/2018/07/EPP-tegevusaruanne-2017.pdf> (03.05.2019)
- [36] **Harder, J.** (2018). Glass recycling – Current market trends. Recovery 05, Barcelona. [veebileht] [https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends\\_3248774.html](https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends_3248774.html) (08.05.2019)
- [37] Recycle rates for packaging waste. European Commission. EUROSTAT. <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00063&language=en> (03.05.2019)
- [38] Glass: Material-Specific Data. *s.a.* – United States Environmental Protection Agency. [veebileht] <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/glass-material-specific-data#GlassTableandChart> (06.05.2019)

- [39] **Terazono, A., Moriguchi, Y., Yamamoto, S. Y., Sakai, S., Inanc, B., Yang, J., Siu, S., Shekdar, V. A., Lee, H-D., Idris, B. A., Magalank, A. A., Peralta, L. G., Lin, C-C., Vanapruk, P., Mungcharoen, T.** (2005). Waste Management and Recycling in Asia. International Review for Environmental Strategies, Vol. 5, No. 2. IGES. 477-498 lk.
- [40] **Poole, A. B., Glasser, P. F., Swamy, S. N. R., Sims, I., Chatterjee, S., Förfös, Z., Thaulow, N., Ólafsson, H., Grattan-Bellow, E. P., St. John, A. D., Nishibayashi, S., Okada, K., Kawamura, M. Kobayashi, K. Kojima, T., Miyagawa, T., Nakano, K., Ono, K., Mullick, K. A.** (2003). The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Koost. Swamy, N. R. Blackie and Son Ltd. Inglismaa. 335 lk.
- [41] **Mercan, V. s.a.** Case Study: Alkali Silica Reaction – Concrete Cancer. – Meka. [veebileht] <https://www.mekaglobal.com/en/blog/case-study-alkali-silica-reaction-concrete-cancer> (26.05.2019)
- [42] **Lahdensivu, J., Köliö, A., Husaini, D.** (2018). Alkali-silica reaction in Southern-Finland's bridges. Case Studies in Construction Materials. Vol. 8. 469,475 lk.
- [43] **Saccani, A., Bignozzi, C. M.** (2010). ASR Expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 40. 531-536 lk.
- [44] **EVS-EN 12620:2005+A1:2008.** (2008). Betooni täitematerjalid. Tallinn: Standardikeskus.
- [45] **Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., Rodriguez, D.** (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. Cement and Concrete Research. Vol. 30. 91-100 lk.
- [46] **Islam Sadiqul, M. G., Rahman, H. M., Kazi, N.** (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. International Journal of Sustainable Built Environment. Vol. 6. 37-44 lk.
- [47] **Olofinnade, M. O., Ede, N. A., Ndambuki, M. J., Ngene, U. B., Akinwumi, I. I., Ofuyatan, O.** (2018). Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand. Cogent Engineering. Vol 5. 19 lk.
- [48] **Bisht, K., Ramana, V. P.** (2018). Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate. Construction and Building Materials. Vol 177. 116-124 lk.
- [49] **Castro, S., Brito, J.** (2013). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. Journal of Cleaner Production. Vol. 41. 7-14 lk.
- [50] **Kim, S. I., Choi, Y. S., Yang, I. E.** (2018). Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate. Construction and Building Materials. Vol 184. 269-277 lk.

- [51] Tsement. S.a. – Wikipedia. [veebileht] <https://et.wikipedia.org/wiki/Tsement> (03.05.2019)
- [52] EVS-EN 197-1:2011. (2011). Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioon ja vastavuskriteeriumid. Tallinn: Standardikeskus.
- [53] **Desire, J. T., Léopold, M.** (2013). Impact of clay particles on concrete compressive strength. International Research Journal on Engineering. Vol. 1. 49-56 lk.
- [54] **Yalley, P. P., Sam, A.** (2018). Effects of Sand Fines and Water/Cement Ratio on Concrete Properties. Civil Engineering Research Journal. Vol. 4. 7 lk.
- [55] Kozul, R., Dawrin, D. (1997). Effects of aggregate type, size and content on concrete strength and fracture energy. Structural Engineering and Engineering Materials. SM Report no. 43. 85 lk.
- [56] Effect of Water Impurities on Concrete Strength, Durability and Other Properties. *s.a.* – The Constructor. [veebileht]. <https://theconstructor.org/concrete/effect-water-impurities-concrete-properties/17123/> (03.05.2019)
- [57] Tsement. *s.a.* - Kunda Nordic AS. [veebileht] <https://www.knc.ee/et/node/4681> (03.05.2019)
- [58] Karastatud klaas. *s.a.* Klaasissepa OÜ. - [veebileht] <https://klaasissepa.ee/tooted/klaasid/karastatud-klaas/> (05.05.2019)
- [59] **Vocialta, M., Corrado, M., Molinari, F. J.** (2018). Numerical analysis of fragmentation in tempered glass with parallel dynamic insertion of cohesive elements. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 188. 448-469 lk.
- [60] EVS-EN 12150-1:2015. (2015). Ehitusklaas. Termiliselt tugevdatud lubi-liiv-turvaklaas. Osa 1: Termin ja kirjeldus. Tallinn: Standardikeskus.
- [61] EVS-EN 1008:2002. (2002). Veeproovide võtmine, katsetamine ja kasutuskõlblikkuse hindamine, sh betoonitootmisest pärineva taaskasutatava vee kasutamine betooni seguveena. Tallinn: Standardikeskus.
- [62] EVS-EN 12390-1:2012 (2012). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 1: Kuju, mõõtmised ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded. Tallinn: Standardikeskus.
- [63] EVS-EN 12390-3:2009. (2009). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus. Tallinn: Standardikeskus.
- [64] EVS-EN 12390-2:2009. (2009). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatsete katsekehade valmistamine ja hoidmine. Tallinn: Standardikeskus.
- [65] EVS-EN 206:2014+A1:2016. (2016). Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus. Tallinn: Standardikeskus.

**LISAD**

## Lisa 1. Materjalide sertifikaadid ning vastavusdeklaratsioonid Tsement



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI CERTIFITSEERIMISASUTUS

### TOIMIVUSE PÜSIVUSE CERTIFIKAAT CERTIFICATE OF CONSTANCY OF PERFORMANCE

**1504 - CPR - 0384**

Koostöös Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrusega 305/2011/EL 9. märtsist 2011. aastal (ehitustoodete määrus e. CPR) kehtib käesolev sertifikaat ehitustootele

**Portlandtsement EN 197-1 – CEM I 42,5 N**  
normtugevusklassiga 42,5, tavalise eeltugevusklassiga N,  
mida kasutatakse betooni ja betoonvalmistoodete ning tsemendibaasiliste mortide valmistamisel,  
mille on turule toonud

**AS Kunda Nordic Tsement**  
(reg. nr. 10156772, Jaama 2, 44106 Kunda, Eesti)  
ja mis on toodetud tehases

**AS Kunda Nordic Tsement**  
(Jaama 2, 44106 Kunda, Eesti).

Käesolev sertifikaat tõendab, et kõik tingimused, mis puudutavad toimivuse püsivuse hindamist ja kontrollimist ja toimivuse püsivust standardi

**EN 197-1:2011**

lisas ZA sätestatud tõendamissüsteemi 1+ järgi on läidetud ja tootja poolt läbi viidud tehase tootmisohjega on tagatud

**ehitustoote toimivuse püsivus.**

Sertifikaat AS Kunda Nordic Tsement portlandtsemendile CEM I 42,5 N väljastati esmakordselt 26. mail 2005. aastal. Käesolev sertifikaat väljastati 09. veebruaril 2018. aastal ja kehtib kuni pole muudetud harmoneeritud standardeid, ei ole oluliselt muudetud ehitustoodet või tootmistingimusi, või kui see ei ole peatatud või lõpetatud teevitatud sertifitseerimisasutuse poolt.

Tallinnas, 09. veebruaril 2018.a.



Tanel Tuisk  
Tallinna Tehnikaülikool  
Sertifitseerimisasutuse juhataja



EAK poolt akrediteeritud toote-sertifitseerimis-  
asutus registreerimisnumbriga PC017  
EAK accredited product certification body  
Reg. No PC017

Tallinna Tehnikaülikool, Tallinna Tehnikaülikooli Sertifitseerimisasutus NB 1504  
Tallinn University of Technology, Certification Centre of Tallinn University of Technology NB 1504  
Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Eesti / Estonia  
Reg nr / Reg No 74000323  
Tel / Phone +372 620 2450, E-mail ca@ttu.ee



## Lisa 1 järg

### Lubjakivikillustik

#### TOIMIVUSDEKLARATSIOON Nr 1504-CPR-227/14-201905101

1. Tootetüübi identifitseerimiskood: lubjakivikillustik 8/16
2. Kasutusotstarve: hoonete, teede ja rajatiste ehitamisel kasutatava betooni valmistamiseks kasutatav täitematerjal
3. Tootja: Kaltsiit AS  
Otisaare, Mõisaküla küla, Põltsamaa vald, 48213 Jõgeva maakond  
Reg nr 10034187  
Tootmiskoht: Otisaare karjäär, Põltsamaa vald, Jõgevamaa
4. Ehitustootete toimivuse püsivuse hindamise ja kontrollimise süsteem 2+
5. EN 12620:2002+A1:2008
6. Teavitatud asutus:  
TTÜ Sertifitseerimisasutus reg. nr. 1504
7. Deklareeritud toimivus:

Põhiomadused		Toimivus
Tera kuju, suurus ja tihedus	Tera suurus	8/16
	Terastikuline koostis	Gc 80/20
	Kesksoela läbimõõt	25...70
	Tera kuju	F15
	Tihedus külastatud pindkuivas olekus	2,65 Mg/m³
	Tihedus väljakulvatatud olekus	2,60 Mg/m³
	Näiv tihedus	2,72 Mg/m³
Puhtus	Peenosised	f4
Purunemiskindlus		LA30
Purustatud pindade sisalduse kategooria		C100/0
Terade veemavus		WA <sub>24</sub> 2
Kõlmakindlus		F2
Vees lahustuvate kloriidide sisaldus		0,006 %
Petrograafiline kirjeldus		kaltsiumkarbonaat
Huumuse sisaldus		Heledam etalonist
Radiatsiooni tase	Eriaktiivsus I	I ≤ 1

8. Eespool kirjeldatud toote toimivus vastab deklareeritud toimivusele. Käesolev toimivusdeklaratsioon on välja antud kooskõlas määrusega (EL) nr. 305/2011 eespool nimetatud tootja ainuvastutusel.

Tootja poolt ja nimel allkirjastanud:

AS Kaltsiit kvaliteedijuht      Raimo Lehist

(allkiri)



10.05.2019

(väljastamise kuupäev)

## Lisa 1 järg

## Liiv

**VAHTER**  
INSENERIBÜROO



**HENDRIKSON**  
ENGINEERING COMPANY

V-P08/8

Teavitatud asutus nr 2325

**TOOTMISOHJE SERTIFIKAAT**

**2325-CPR-0004**

Sertifikaat kehtib kooskõlas Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrusega (EL) nr 305/2011, 9.märtsist 2011 (ehitustoodete määrus e. CPR) järgneva ehitustoote kohta:

**Kalda karjääri täitematerjalid**

0/4, 0/8  
kasutamiseks betooni täitematerjalina,

0/4, 0/8, 8/16, 16/32  
kasutamiseks asfaltsegude ja pindamiskihide täitematerjalina,

0/8, 0/16, 0/32, 8/16, 16/32  
kasutamiseks ehituses ja teedehituses hüdrauliselt seotud ja sidumata täitematerjalina,

mille on oma nime või kaubamärgi all turul kättesaadavaks teinud

**OÜ Krüüdneri Karjäär**  
registrikood 10698390, Näituse 21, 50409 Tartu

ja tootnud

**OÜ Krüüdneri Karjäär, Kalda karjäär,**  
Krüüdneri küla, Kanepi vald, Põlvamaa.

Sertifikaat tõendab, et kõik standardite:

**EN 12620:2002+A1:2008**  
**EN 13242:2002+A1:2007**  
**EN 13043:2002 ja EN 13043:2002/AC:2004**

lisa ZA süsteemi Z+ kohased toimivuse püsivuse hindamist ja kontrollimist käsitlevad nõuded on täidetud ja

**tootmisohje on hinnatud kohalduvatele nõuetele vastavaks.**

Sertifikaat väljastati esmakordselt CPD kohaselt 30.09.2011 ja kehtib kuni 30.09.2020 kui oluliselt ei muudeta ühtlustatud standardit, ehitustoodet, AVCP menetlust ega tootmistingimusi ning teavitatud tootmisohje sertifitseerimisasutus ei ole sertifikaati peatanud või tühistanud.

Tallinn, 28.02.2019

**Peeter Vahter**  
Peaekspert



Sertifikaadi kehtivust saab kontrollida saates päringu  
Inseneribüroo Vahter & Hendrikson e-posti aadressil [info@inseneriburoo.ee](mailto:info@inseneriburoo.ee)

Inseneribüroo Vahter & Hendrikson OÜ  
Raua 49, 10132 Tallinn, Eesti / Eestonia



**139841**

## Lisa 2. Erinevate koostisega betoonisegude survetugevuse katsetamise tulemused

Katsekehade purustamine EMÜ laboratooriumis

Kuupäev 24/01/2019

Segu	Kuubi nr.	Katsekeha mõõtmed			Purustav jõud $F_c$ , kN	Survetugevus	Betooni klass
		$a$ (mm)	$b$ (mm)	pindala $A$ (mm <sup>2</sup> )		N/mm <sup>2</sup> (Mpa)	
Klaas 1	1	149	150	22350	497,50	22,26	C16/20
Klaas 1	2	151	152	22952	442,50	19,28	C12/15
Klaas 1	3	150	149	22350	555,00	24,83	C16/20
Klaas 1	4	151	150	22650	487,50	21,52	C16/20
Klaas 1	5	150	150	22500	547,50	24,33	C16/20
Klaas 1	6	151	150	22650	500,00	22,08	C16/20
Klaas 1	7	150	150	22500	530,00	23,56	C16/20
Klaas 1	8	150	152	22800	525,00	23,03	C16/20
Klaas 1	9	150	152	22800	530,00	23,25	C16/20
Klaas 1	10	150	150	22500	725,00	32,22	C25/30
Klaas 1	11	150	152	22800	400,00	17,54	C12/15
Klaas 1	12	150	151	22650	730,00	32,23	C25/30
Klaas 1	13	153	150	22950	550,00	23,97	C16/20
Klaas 1	14	150	150	22500	487,50	21,67	C16/20
Klaas 1	55	151	150	22650	525,00	23,18	C16/20
Klaas 1	56	152	149	22648	462,50	20,42	C16/20
Betonisegu "Klaas 1" keskmine survetugevus						23,46	C20/25

Katsekehade purustamine EMÜ laboratooriumis

Kuupäev: 28/03/2019

Segu nr.	Kuubi nr.	Katsekeha mõõtmed			Purustav jõud $F_c$ , kN	Survetugevus	Betooni klass
		$a$ (mm)	$b$ (mm)	pindala $A$ (mm <sup>2</sup> )		N/mm <sup>2</sup>	
Klaas 1-90	33	150	152	22800	760,00	33,33	C25/30
Klaas 1-90	34	150	151	22650	725,00	32,01	C25/30
Klaas 1-90	35	150	150	22500	710,00	31,56	C25/30
Klaas 1-90	36	151	152	22952	692,50	30,17	C25/30
Betonisegu "Klaas 1" keskmine survetugevus peale 90 päeva möödumist						31,77	C25/30

## Lisa 2 järg

### Katsekehade purustamine EMÜ laboratooriumis

Kuupäev: 28/03/2019

Segu	Kuubi nr.	Katsekeha mõõtmed			Purusta v jõud $F_c$ , kN	Survetugevus	Betooni klass
		$a$ (mm)	$b$ (mm)	pindala $A$ (mm <sup>2</sup> )		N/mm <sup>2</sup> (Mpa)	
Klaas 2	24	150	149	22350	875,00	39,15	C30/37
Klaas 2	25	150	152	22800	745,00	32,68	C25/30
Klaas 2	26	150	150	22500	730,00	32,44	C25/30
Klaas 2	27	148	150	22200	862,50	38,85	C30/37
Klaas 2	28	149	150	22350	822,50	36,80	C25/30
Klaas 2	29	150	150	22500	825,00	36,67	C25/30
Klaas 2	30	148	150	22200	797,50	35,92	C25/30
Klaas 2	31	150	150	22500	802,50	35,67	C25/30
Klaas 2	32	149	150	22350	787,50	35,23	C25/30
Klaas 2	46	148	150	22200	712,50	32,09	C25/30
Klaas 2	47	149	151	22499	647,50	28,78	C20/25
Klaas 2	48	150	150	22500	732,50	32,56	C25/30
Klaas 2	49	149	151	22499	495,00	22,00	C16/20
Klaas 2	50	149	151	22499	730,00	32,45	C25/30
Klaas 2	51	149	152	22648	740,00	32,67	C25/30
Klaas 2	52	149	152	22648	515,00	22,74	C16/20
Klaas 2	53	149	151	22499	705,00	31,33	C25/30
Klaas 2	54	152	149	22648	640,00	28,26	C20/25
Betonisegu "Klaas 2" keskmine survetugevus						32,57	C25/30

## Lisa 2 järg

### Katsekehade purustamine EMÜ laboratooriumis

Kuupäev: 28/03/2019

Segu nr.	Kuubi nr.	Katsekeha mõõtmed			Purustav jõud $F_c$ , kN	Survetugevus	Betooni klass
		$a$ (mm)	$b$ (mm)	pindala $A$ (mm <sup>2</sup> )		N/mm <sup>2</sup> (Mpa)	
Klaas 3	15	154	149	22946	642,50	28,00	C20/25
Klaas 3	16	150	149	22350	757,50	33,89	C25/30
Klaas 3	17	150	148	22200	700,00	31,53	C25/30
Klaas 3	18	150	150	22500	670,00	29,78	C20/25
Klaas 3	19	149	150	22350	717,50	32,10	C25/30
Klaas 3	20	155	150	23250	615,00	26,45	C20/25
Klaas 3	21	149	152	22648	525,00	23,18	C16/20
Klaas 3	22	155	150	23250	712,50	30,65	C25/30
Klaas 3	23	150	150	22500	692,50	30,78	C25/30
Klaas 3	37	151	149	22499	545,00	24,22	C20/25
Klaas 3	38	152	150	22800	820,00	35,96	C25/30
Klaas 3	39	149	149	22201	592,50	26,69	C25/30
Klaas 3	40	150	149	22350	670,00	29,98	C25/30
Klaas 3	41	149	152	22648	630,00	27,82	C25/30
Klaas 3	42	149	150	22350	510,00	22,82	C16/20
Klaas 3	43	150	150	22500	817,50	36,33	C25/30
Klaas 3	44	151	150	22650	592,50	26,16	C25/30
Klaas 3	45	152	151	22952	687,50	29,95	C25/30
Betonisegu "Klaas 3" keskmine survetugevus						29,24	C20/25

### **Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Klaid Melnikov,

Sünniaeg: 15/05/1995

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
’’Klaasjäätmete kasutamine betooni täitematerjalina ning selle mõju betooni survetugevusele’’,

mille juhendaja on Vello Pallav,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete  
kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 3. juuni 2019

---

### **Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)